



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE**

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**VLIV NÁKUPU BRUSNÉHO CNC CENTRA NA  
PRODUKTIVITU VÝROBY**

AN EFFECT OF PURCHASE OF CNC GRINDING CENTER ON PRODUCTIVITY OF MANUFACTURING

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Václav Šedo**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**doc. Ing. Josef Chladil, CSc.**

**BRNO 2018**

# Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie  
Student: **Bc. Václav Šedo**  
Studijní program: Strojní inženýrství  
Studijní obor: Strojírenská technologie  
Vedoucí práce: **doc. Ing. Josef Chladil, CSc.**  
Akademický rok: 2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## Vliv nákupu brusného CNC centra na produktivitu výroby

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Přehled v oblasti broušení. Kinematika brusného centra, technicko-ekonomické zhodnocení výroby dílců na daném centru s porovnáním alternativní výroby.

### Cíle diplomové práce:

Rešerše problematiky broušení.  
Rozbor kinematiky brusného centra.  
Porovnání výroby s výrobou alternativní.  
Technicko-ekonomické zhodnocení.

### Seznam doporučené literatury:

KOCMAN, K. a J. PROKOP. Technologie obrábění. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005. ISBN 80-214-3068-0.

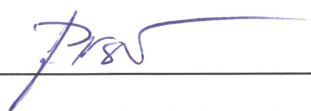
ŘASA, J., P. POKORNÝ a V. GABRIEL. Strojírenská technologie 3. 2. vyd. Praha: Scientia, 2005. ISBN 80-718-3336-3.

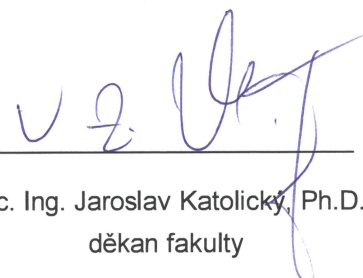
MASLOV, J. Teorie broušení kovů. Praha: SNTL, 1979. ISBN 80-718-3336-3.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18.

V Brně, dne 27. 10. 2017



  
\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
ředitel ústavu

  
\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

**ABSTRAKT**

Diplomová práce teoreticky rozebírá metodu třískového obrábění broušení – její historii, princip a využití, nástroje a dosažené parametry, kinematiku procesu. Dále zpracovává rozbor brusného CNC centra Hauser H45-400, jeho kinematiku, parametry stroje a příslušenství ke stroji. V závěru práce je technicky a ekonomicky vyhodnoceno obrábění několika součástí na tomto stroji a porovnáno s výrobou alternativní.

**Klíčová slova**

Broušení, CNC centrum, kinematika broušení, elektroerozivní hloubení/řezání drátem.

**ABSTRACT**

This master's thesis familiarizes reader with technology of machine grinding – it's history, principle, general use, related tools, achievable parameters and kinematics of grinding process. The core of work is analysis of jig-grinder Hauser H45-400, it's kinematics, machine technical data, options and accessories. Work concludes with technical and economical assessment of machining of several parts with this machine and compares results to alternative options of machining.

**Key words**

Grinding, CNC center, grinding kinematics, electrical discharge machining/wire cutting.

**BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

ŠEDO, V. *Vliv nákupu brusného CNC centra na produktivitu výroby*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 54 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Josef Chladil, CSc..

**PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Vliv nákupu brusného CNC centra na produktivitu výroby** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

---

Datum

---

Bc. Václav Šedo

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto panu doc. Ing. Josefovi Chladilovi, CSc., za odborné vedení při tvorbě diplomové práce, dále panu Ing. Jiřímu Doležalovi za cenné připomínky a praktické rady při vypracování diplomové práce. A také děkuji své rodině za podporu během tvorby této práce a celého studia.

**OBSAH**

ABSTRAKT .....	4
PROHLÁŠENÍ.....	5
PODĚKOVÁNÍ .....	6
OBSAH.....	7
ÚVOD.....	9
1 BROUŠENÍ.....	10
1.1 Princip broušení .....	10
1.1.1 Základní pojmy procesu .....	10
1.1.2 Charakteristika broušení.....	12
1.2 Historie broušení .....	12
1.2.1 Počátky broušení.....	12
1.2.2 Starověk a středověk – výroba nástrojů a zbraní .....	13
1.2.3 19. až 21. století – novodobé aplikace .....	14
1.3 Brousicí nástroj .....	14
1.3.1 Brusivo .....	14
1.3.2 Pojivo .....	15
1.3.3 Zrnitost .....	16
1.3.4 Brousicí kotouče .....	17
1.4 Rozdělení brousicích strojů .....	18
1.4.1 Brusky na díry .....	18
1.4.2 Hrotové brusky .....	19
1.4.3 Bezhruté brusky .....	20
1.4.4 Rovinné brusky .....	21
1.4.5 Speciální brusky.....	22
1.5 Přesnost a drsnost obráběné plochy .....	23
2 TECHNOLOGICKÉ APLIKACE BROUŠENÍ .....	25
2.1 Vnitřní obvodové broušení do kulata .....	25
2.1.1 Vnitřní otvorové axiální broušení .....	26
2.1.2 Vnitřní otvorové radiální broušení.....	27
2.1.3 Vnitřní otvorové planetové broušení .....	27
2.2 Vnější obvodové broušení do kulata.....	28
2.2.1 Vnější obvodové axiální broušení.....	28
2.2.2 Vnější obvodové hloubkové broušení.....	29
2.2.3 Vnější obvodové radiální broušení .....	29

2.2.3	Vnější obvodové bezhroté broušení průběžné a radiální .....	30
2.3	Vnější rovinné broušení .....	30
2.3.1	Vnější rovinné broušení obvodem kotouče .....	30
2.3.2	Vnější rovinné broušení čelem kotouče .....	31
3	BRUSNÉ CNC CENTRUM HAUSER H45-400 .....	33
3.1	Kinematika stroje H45-400 .....	33
3.2	Požadavky stroje pro vysokou přesnost.....	35
3.3	Doplňky a příslušenství brusného centra .....	35
3.4	Technická data stroje .....	37
4	ANALÝZA OBRÁBĚNÝCH SOUČÁSTÍ A VÝBĚR NEJVHODNĚJŠÍCH METOD OBRÁBĚNÍ .....	38
4.1	Rozbor konstrukcí a materiálů obráběných součástí .....	38
4.2	Přehled obráběných součástí .....	38
4.3	Výběr vhodné technologické metody obrábění otvorů.....	44
4.3.1	Dokončení otvorů frézováním .....	44
4.3.2	Broušení na planetové brusce Hauser H45-400 .....	44
4.3.3	Obrábění elektroerozivním obráběním .....	45
4.4	Výběr nejvhodnější výrobních metod.....	45
5	TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ .....	46
5.1	Porovnání výroby z hlediska strojních časů.....	46
5.2	Obvykle dosahované parametry drsnosti po obrábění obou metod.....	47
5.3	Porovnání výroby z hlediska nákladů .....	48
	ZÁVĚR .....	50
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	51
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	53
	SEZNAM PŘÍLOH .....	54



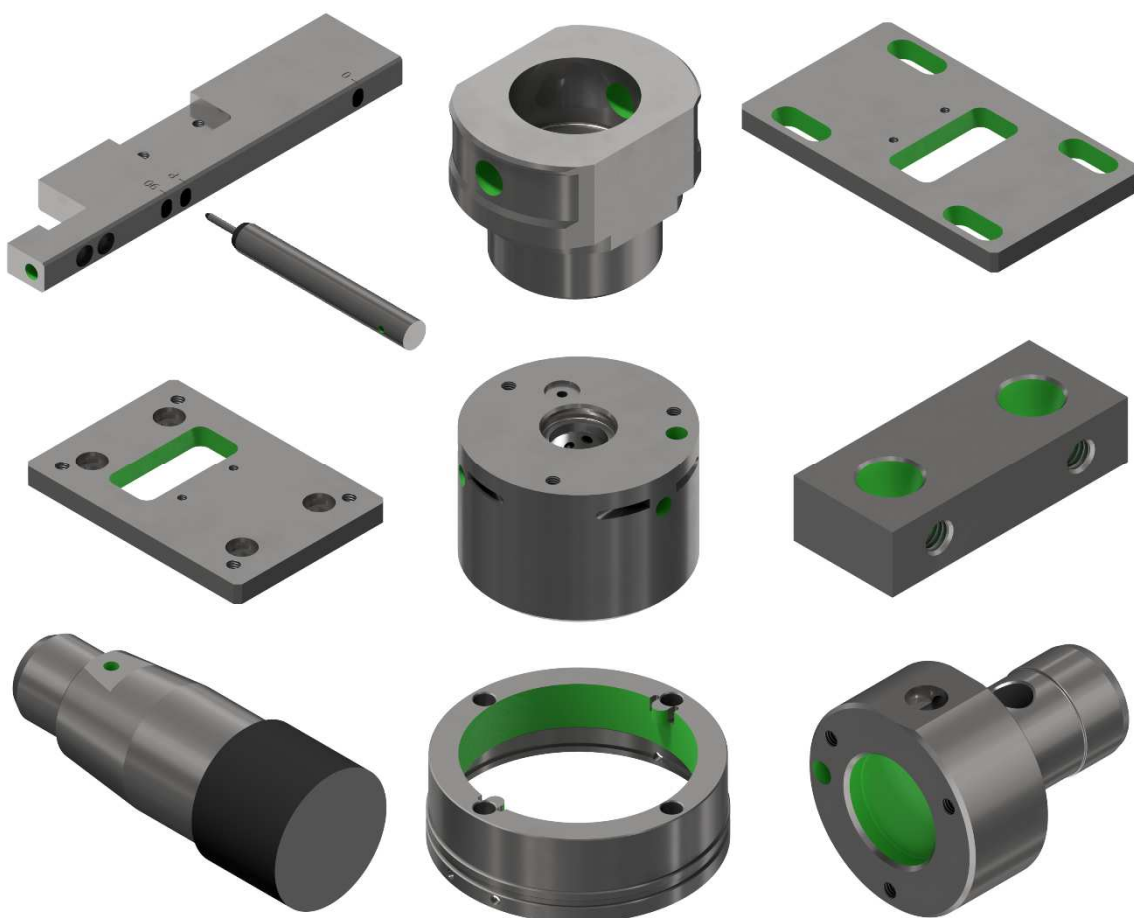
## ÚVOD

Vzhledem ke stále se zrychlujícímu technologickému vývoji musí subjekty ve strojírenském průmyslu za účelem udržení konkurenceschopnosti neustále modernizovat technologie s ohledem na přesnost a ekonomičnost výroby. Což znamená, že v současné době je pro podniky v průmyslovém odvětví, zaměřující se na strojní třískové obrábění, prakticky nutností využívat pro obrábění moderní CNC stroje.

Tato diplomová práce rozebírá brousící práce na stroji Hauser H45-400, bruska pro planetové broušení, od výrobce Kellenberger, spadající do skupiny Hardinge incorporated. Společnost Kellenberger byla založena v roce 1917 a zabývá se výrobou automatizovaných a numericky řízených výrobních strojů zaměřených na precizní broušení. Brousící práce probíhají na nástrojárně v kusové výrobě.

Pro analýzu brousících prací bylo vybráno 10 součástí, u kterých jsou broušeny otvory a díry s předepsanou vysokou přesností rozměru a kvalitou povrchu plochy. Součásti jsou znázorněny na obrázku 0.1.

Následně je navržena alternativní výroba pro výrobu daných otvorů. Obě tyto výrobní metody jsou zanalyzovány, porovnány a v závěru práce je vyhodnoceno, která metoda je pro výrobu výhodnější.



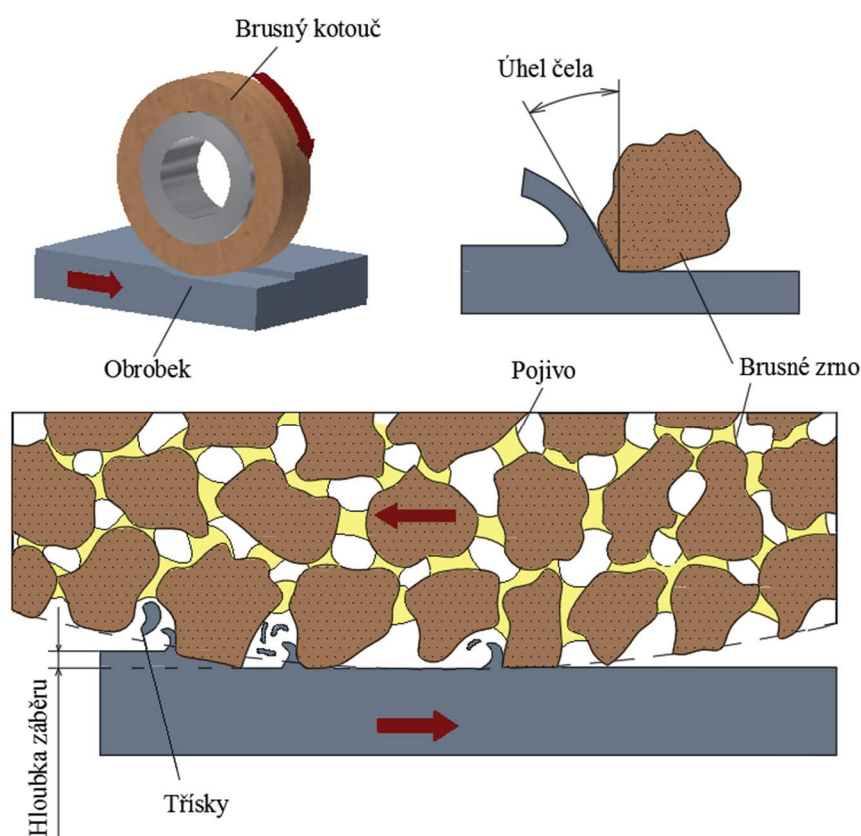
Obrázek 0.1 Obráběné součásti.

## 1 BROUŠENÍ

Broušení je metoda třískového obrábění s nedefinovanou geometrií břitu používána především k dokončovací operaci. Využívá se hlavně u operací, kde je vyžadována vysoká přesnost tvaru a rozměrů a drsnost povrchu obrobených ploch. Touto metodou je možné obrábět i tvrdé materiály, kupříkladu po tepelném zpracování (kalené a cementované součásti) nebo třeba slinuté karbidy, či nekovové materiály [1, 2, 3, 4, 5].

### 1.1 Princip broušení

Broušení je třískové obrábění mnohobřitým nástrojem s nedefinovanou geometrií, reprezentovanou zrny brusiva spojenými pojivem. Princip broušení je znázorněn na obrázku 1.1 [1, 2, 3].



Obrázek 1.1 Princip broušení [6,7].

#### 1.1.1 Základní pojmy procesu

Nástroj: Je tvořen tzv. brusivem. To znamená zrny tvrdých materiálů, přírodních i umělých ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ , diamant, KBN, SiC), spojených do jednoho pružného či tuhého tělesa o různých velikostech a tvarech, nebo jsou nanášena na povrch nástroje a zde upevněna. Příklady nástrojů vázaných v tuhé těleso jsou drážkovací, řezací a brousící kotouče, brousící segmenty, brousící kameny a pilníky. Příklady nástrojů, kde je zrna nanášeno na povrch nástroje, jsou brousící plátina, papíry a pásy. Kromě brusiva je nástroj tvořen také pojivem a póry. Pojivo splňuje funkci spojení brusných zrn dohromady a póry fungují jako zubové mezery [1, 2, 3, 6].

Brousicí nástroje jsou znázorněny na obrázku 1.2.



Obrázek 1.2 Příklady brousicích nástrojů [2].

Pracovní nástroj koná hlavní řezný rotační pohyb, který vykonává za vysokých řezných rychlostí velkým počtem brousících zrn na pracovní ploše zaráz. Na začátku procesu zrna po materiálu kloužou a tím materiál ohřívají. Ohřevem materiálu dochází ke zvýšení teploty a tím se zlepšuje jeho tvárnost a je umožněn odběr zaoblenými zrný nástroje [1, 4].

Více je o nástrojích uvedeno v kapitole 1.3.

Stroj: Stroj pro broušení nazýváme bruskou. Tyto brusky slouží k obrábění součástí s přesnými rozměry, požadovanými geometrickými rozměry a kvalitním povrchem. Na těchto strojích můžeme ostřit nástroje a brousit součásti, které jsou tepelně zpracovány. Aby bylo možno dosáhnout těchto předpokladů u stroje, je nutné, aby byl zaručen klidný chod a dobrá tuhost soustavy (zamezení chvění a otřesů). Dále by mělo být vřeten co nejkratší a uloženo v přesných ložiskách [5, 8].

Příklad stroje pro broušení je CNC bruska zobrazena na obrázku 1.3.



Obrázek 1.3 Příklad brousicího stroje – HAUSER H45-400 [9].

Více je o strojích uvedeno v kapitole 1.4.

### 1.1.2 Charakteristika broušení

Broušení je proces, který probíhá při vysokých řezných rychlostech (30 až 80 m·s<sup>-1</sup>), kde řeznou rychlostí je myšlena rychlost brousících kotoučů. Tyto rychlosti jsou nutné, aby byla zajištěna schopnost zrn odebírat třísku, jelikož je u zrn běžný negativní úhel čela [1, 2, 4, 6].

Podobně jako u ostatních třískových obrábění, probíhá proces broušení v soustavě stroj – přípravek – nástroj – obrobek [8].

Charakteristickým znakem broušení je nepravidelný úběr třísky, který je zapříčiněn nepravidelným rozmístěním zrn v brousícím nástroji a jejich rozlišnou geometrickou formou. Tuto charakteristiku můžeme pozorovat při tzv. „vyjiskřování“, kdy při opakované posuvu obrobku je odebíráno brousícím kotoučem malé množství třísek, při neměnné hodnotě pracovního záběru ostří  $a_e$  [2, 4].

Dalšími příznačnými znaky jsou:

- Při broušení vzniká přerušovaný řez s proměnným průřezem třísek. Jedná se o malý průřez třísek, řádově 10<sup>-3</sup> mm<sup>2</sup>. V procesu dochází vlivem velkých plastických deformací k ohřevu části třísek tak, že se roztaví a zkapalní nebo se spálí [2, 4, 10].
- U broušení nacházíme velké měrné řezné síly a to řádově až desítky tisíc MPa. Tento fakt souvisí s malým průřezem třísek [2].
- Vlivem slabého upevnění zrn v pojivu brusného kotouče jsou zrna schopna přenést pouze malé řezné síly. Broušením dochází k uvolňování jednotlivých zrn, nebo jejich částí. Tuto skutečnost nazýváme „samoostření brousícího kotouče“ [1, 2, 4].
- Nutnost orovnávání brousících kotoučů z důvodu ztráty řezivosti a to otupením ostří jednotlivých zrn a zanesení pórů vzniklými třískami. Řezivost je obnovitelná pomocí orovnávačů [1, 2].
- Rozdílné a převážně záporné úhly čela jednotlivých zrn brusiva. Dochází k ovlivnění podmínek tření a oblasti primární plastické deformace [1, 2].
- Vlivem velkého množství tepla vznikají nepříznivá tahová zbytková napětí v povrchové vrstvě obrobku. Nutnost dostatečného chlazení obrobku [2, 6].

## 1.2 Historie broušení

Jedná se historicky o jednu z nejstarších metod obrábění materiálů, využívanou již v prehistorických dobách k ostření zbraní a pracovních nástrojů. Novodobé aplikace broušení jsou převážně jako dokončovací metoda výroby ve strojírenské výrobě. To ovšem není pravidlem, jelikož s rozvojem této metody – vývoj výkonných brusných nástrojů a brusných center – je možno využívat broušení i v oblasti hrubovacích operací [3].

### 1.2.1 Počátky broušení

Skutečná historie broušení je psána již od doby objevení brousících materiálů. Její hlavní použití a rozvoj je úzce svázán s rozvojem nástrojů a předmětů, člověkem využívaných k zajištění přežití a osobního pohodlí. Prvními nalezenými zmínkami jsou tzv. „pazourkové nože“, které člověk vyráběl třením o hrubou skálu nebo pískovec

a tím zjistil, že nemusí nástroje štípat. Takovéto nalezené nástroje jsou nacházeny po celém světě. Kupříkladu nálezy v Indii, Francii a Číně, které jsou zobrazeny na obrázku 1.4 [5, 11].



Meyral, Francie



Isampur, Indie



Bose, Čína

Obrázek 1.4 Pazourkové nože z různých částí Země [11].

### 1.2.2 Starověk a středověk – výroba nástrojů a zbraní

Postupem času, než byla vytvořena z keramiky, bylo využíváno broušení k opracování nádobí. Ve starém Egyptě se broušení využívalo pro opracování kamenných bloků ke stavbě pyramid. Broušení kovů jako takové, má svůj počátek také ve starém Egyptě a bylo úzce spjato s vynálezem metalurgie kovů. V těchto brzkých dobách bylo převážně využíváno energie v podobě lidské práce, jelikož k objevení účinnějších metod došlo až po mnoha stoletích. Broušení v průběhu staletí bylo velmi ceněným řemeslem, díky němuž bylo možno tvořit různé ornamenty a ostřit nástroje [5].



Obrázek 1.5 Nástroje ze starého Egypta [12].



Do doby průmyslové revoluce bylo broušení využíváno přednostně pro ostření pomůcek, nástrojů, zbraní a brnění. Postupem času byly objevovány lepší metody pohonu brousicích strojů (brusů), než je lidská síla a to kupříkladu pohon vodou. Na obrázku 1.6 je vyobrazen takto poháněný brus [5].



Obrázek 1.6 Brus poháněný vodním pohonem [13].

### 1.2.3 19. až 21. století – novodobé aplikace

K intenzivnímu rozvoji broušení jako třískové operace dochází v druhé polovině 19. století. Až čtvrtina celkového strojního obrábění je v dnešní době tvořena broušením. Skoro vše s čím se setkáváme, bývá broušené, či vyrobené něčím, co bylo broušené. Bez broušení by nebylo možno naostřit řezné nástroje pro soustružení, řezání, frézování a vrtání [2, 5].

### 1.3 Brousicí nástroj

Brousicí nástroj je složen z brusiva, pojiva a pórů. Kvantitativní poměr objemu pojiva, brusiva a pórů označujeme jako sloh kotouče. Čím je toto číslo větší, tím je velikost pórů v kotouči větší. Nástroje pórovité, s větší zubovou mezerou, jsou využívány pro obrábění houževnatých a měkčích materiálů. Nástroje hutné, s menší zubovou mezerou, jsou využívány pro obrábění křehkých a tvrdých materiálů. [1, 4].

Brousicí nástroje posuzujeme z hlediska tvrdosti a struktury nástroje, druhu pojiva a brousicího materiálu, zrnitosti brusiva, geometrického tvaru a rozměrů [8].

Z hlediska tvaru nástroje je nejvíce využíváno brousicích kotoučů.

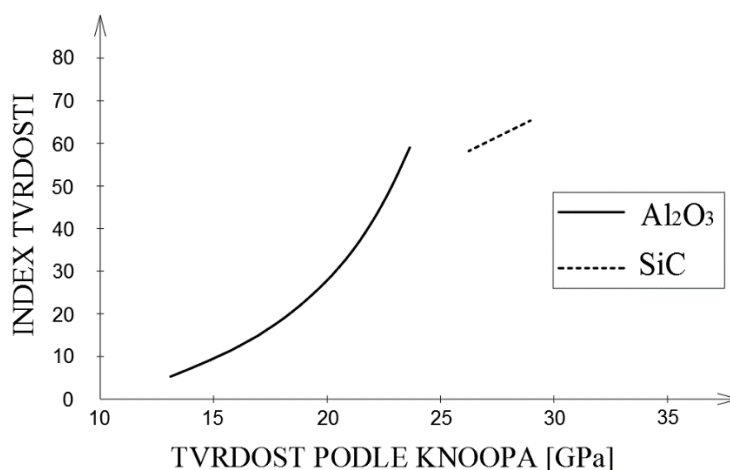
#### 1.3.1 Brusivo

Brusivem označujeme krystalickou látku zrnitého složení, jejíž zrna jsou houževnatá, tvrdá a ostrohranná. Materiálem bývají zpravidla přírodní či umělé látky s vhodnými vlastnostmi pro pracovní proces. Přírodní brusivo, jako je pískovec, granát, diamant, korund a další, bývá znečištěné, čímž je zapříčiněno nerovnoměrné složení. U umělých brusiv toto nerovnoměrné

rozložení nenalezneme. Bývá vyrobeno z více látek - mezi jeho zástupci nalezneme karbid křemíku, karbid boru, umělý korund, aj. K broušení využíváme volných zrn brusiva (brousící prášky), či zrn rozptýlených v mazadle (leštící pasty), nebo zrn přilepených k vhodnému poddajnému podkladu (plátno, papír) a zrn spojených pojivem v tuhá tělesa vhodného slohu a tvaru (brousící kotouče) [1, 6].

Póry zpravidla bývají menších rozměrů než brousící zrna, ovšem mohou být i větší. Tyto drobné otvory tvoří mezi zrny zubové mezery, kterými je odváděna tříska a přiváděna řezná kapalina. Jejich vzniku je dosaženo uměle a to pomocí přísad z pórotvorných složek [5].

Primární vlastností brusiva je jeho tvrdost. Ta je určována buď jako statická tvrdost, zkoušky tvrdosti Vickers a Knoop, nebo dynamická tvrdost (drobivost), zkouška rozmělnovací. Pro rostoucí statickou tvrdost platí, že roste i drobivost. Drobivost bývá u nástrojů do jisté míry žádaná, zajišťuje totiž proces „samoostření“ nástroje. Korelaci mezi drobivostí a statickou drsností můžeme pozorovat na obrázku 1.7, kde drobivost je vyjádřena indexem drobivosti, který vyjadřuje procento zrn jisté velikosti, která prošla po semletí sítím pro zrna menší velikosti. [14]



Obrázek 1.7 Závislost drobivosti zrn na jejich tvrdosti [14].

### 1.3.2 Pojivo

Pojivo je přísada k práškovým a zrnitým látkám, aby vznikla kompaktní látka. Tato pojiva mohou být anorganického či organického původu. Vhodná volba druhu pojiva zaručuje při výrobě brousícího kotouče potřebné vlastnosti. Soudržnost pracovního nástroje je určena množstvím, druhem a zpracováním pojiva [6].

Účelem pojiva je spojovat a udržovat brousící zrna v nástroji pokud jsou ostrá. Při správné volbě pojiva dochází k samovolnému uvolňování otupených zrn z povrchu nástroje a odkrývání ostrých zrn v hlubší vrstvě. Takto je zaručena ostrost nástroje při používání [3].

Nejčastěji bývá využíváno anorganických pojiv a to především pojiva pryskyřičného. Jeho výhodou je možnost broušení s chlazením i za sucha. Pryskyřičná pojiva mají vysokou produktivitu, „samoostřící“ efekt a poměrně nízkou cenu. Kotouče s tímto druhem pojiva nelze orovnat diamantem, ale korundovým brouskem [1, 2, 6].

Pojivo keramické má vysokou pevnost v tahu. Nevýhodou keramického pojiva je jeho křehkost. Používá se pro velmi produktivní obrábění kalených ocelí. Další využití má ve spojení v diamantových kotoučích, které jsou užívány pro broušení nástrojů z polykrystalického diamantu [1, 6].

Galvanické pojivo je využíváno u brousicích nástrojů z diamantu a kubického nitridu boru pro broušení otvorů a u speciálních tvarových kotoučů. Specifické parametry pro galvanické pojivo je vysoký výkon a malý přítlak. Je možné očišťovat v případě zanesení [2].

Kovová pojiva jsou využívána pro broušení stavebních materiálů a skla. Jsou vyžadovány vysoké nároky na stálost řezné hrany a tvaru [5].

### 1.3.3 Zrnitost

Zrnitost je velikost jednotlivých zrn v brousicím nástroji. Ovlivňuje výsledné opracování a výsledné broušení. Zrnitost je volena podle požadovaného opracování [15].

Zrnitost brousicích kotoučů je uvedena v tabulce 1.1.

Tabulka 1.1 Zrnitost brousicích kotoučů [15].

Druh	Číslo zrna	Měrný rozměr zrna [ $\mu\text{m}$ ]		Použití (informativní)
		od	do	
Hrubá zrna	4	5 000	4 000	Ve zvláštních případech
	6	4 000	3 150	
	8	3 150	2 500	
	10	2 500	2 000	
	12	2 000	1 600	
	14	1 600	1 250	
	16	1 250	1 000	Hrubování
	20	1 000	800	
	24	800	630	
	30	630	500	
	36	500	400	
Střední zrna	46	400	315	Strojní části, ostření nástrojů
	60	315	250	
	70	250	200	
	80	200	160	
	100	160	125	
	120	125	100	
Jemná zrna	150	100	80	Předhlazení
	200	80	63	
	240	63	50	
	280	50	40	
	320	40	32	
Mikrozrna	M32	32	32	Dohlazení, konečné lapování
	M22	22	15	
	M15	15	10	
	M10	10	7	
	M7	7	5	Ve zvláštních případech
	M5	5	3	
	M3	3	-	

Zrna číslo 4 až 320 jsou tříděna sítý, zrna M32 až M3 plavením [15].



### 1.3.4 Brousicí kotouče

Nejčastějším nástrojem pro broušení je brousicí kotouč. Jedná se o mnohabřitý řezný nástroj, kde řezné břity tvoří tvrdá zrna brusiva. Každé dílčí zrno brusiva funguje jako řezný nástroj, kterým jsou odebírány drobné třísky. Třísky jsou malého průřezu a účinkem vysokých teplot při odběru odchází ve formě jisker. Zrna jsou v tuhé těleso spojena pojivem. Tato zrna jsou v pracovní ploše nástroje rozmístěna nepravidelně a díky nepravidelnému tvaru jejich vrcholy mají převážně záporné řezné úhly [1].

Brousicí kotouč je znázorněn na obrázku 1.8.



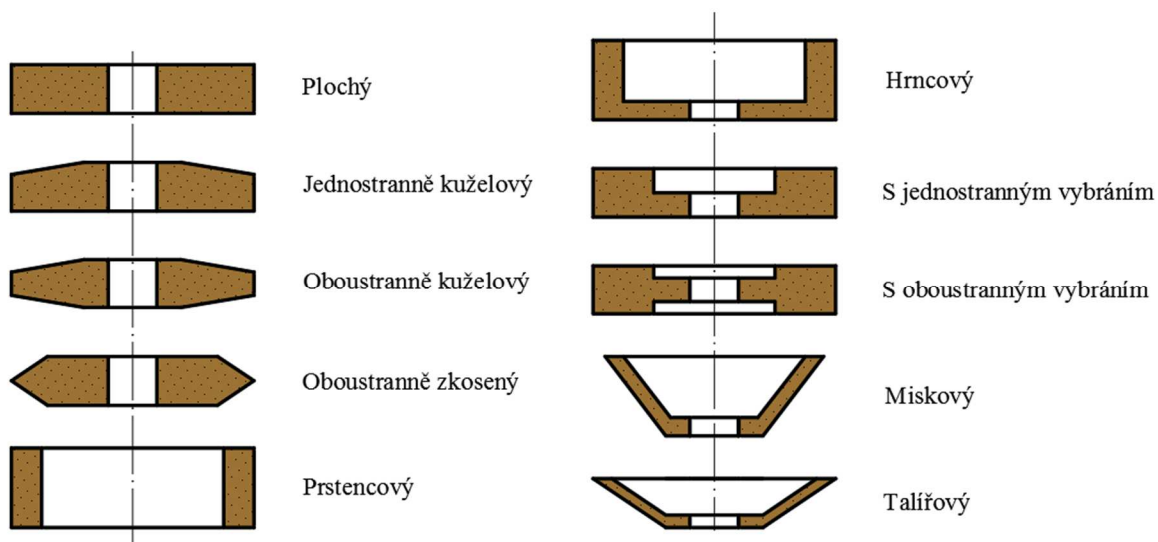
Obrázek 1.8 Řezný nástroj – brousicí kotouč

Mezi základní parametry brousicích kotoučů patří jejich tvrdost. Tato vlastnost vyjadřuje odpor zrn brusiva proti jejich vylomení z nástroje, tzn. schopnost kotouče udržet zrna brusiva ve vazbě. Jedná se tedy o míru pružnosti a houževnatosti můstků pojiva mezi jednotlivými zrny. S tvrdostí kotouče souvisí „samoostření“, kde u měkkých kotoučů se zrna brusiva po otupení uvolňují snadněji, než u kotoučů tvrdých. Tvrdost kotouče není totožná s tvrdostí zrn brusiva [6]

Označení tvrdosti brousicích kotoučů se provádí písmeny velké abecedy G až Z. Kde G je velmi měkký kotouč a Z zvlášť tvrdý kotouč. [3, 5, 6]

Správně zvolená tvrdost kotouče se vyznačuje vylomením zrn brusiva po jejich opotřebení. Pokud je kotouč příliš tvrdý, dochází k nutnosti orovnávání kotouče. Oproti tomu u měkkých kotoučů je ostrost zaručena, ovšem dochází k jejich brzkému opotřebení. Zpravidla je dodržováno, že měkkým kotoučem jsou broušeny tvrdé materiály a naopak [2, 6].

Z hlediska rozměrů a geometrického tvaru kotouče, které jsou normalizovány v normě ČSN, jsou využívány různé typy nástrojů, které jsou vybírány podle typu práce a tvaru broušené plochy. Tvary brousicích kotoučů jsou znázorněny na obrázku 1.9 [1, 6].



Obrázek 1.9 Tvary brousicích kotoučů [1, 3, 6].

#### 1.4 Rozdělení brousicích strojů

Brousicí stroje, zkráceně brusky, jsou využívány pro broušení strojních součástí, kde se jedná o brusky výrobní, či k broušení nástrojů, kde mluvíme o bruskách nástrojových.

Brusky můžeme rozdělit dle tvaru broušení, či podle druhu práce.

Dělení podle druhu práce:

- Brusky na díry,
- brusky hrotové,
- brusky bezhroté,
- brusky rovinné,
- speciální brusky [3].

##### 1.4.1 Brusky na díry

Brusky na díry jsou využívány k broušení rotačních součástí, jmenovitě vnitřních a čelních ploch. Brusky na díry slouží převážně k dokončovací operaci. Obrobek je upínán pomocí elektromagnetické desky nebo do sklíčidla [4].

Brusky na díry můžeme rozdělit na brusky s otáčejícím obrobkem a planetové [2, 4].

Brusky s otáčejícím se obrobkem jsou vhodné především pro obrábění souosých děr součástí válcového tvaru. Pracovní posuv je dle velikosti obrobku vykonáván pro velké součásti nástrojem a pro malé součásti obrobkem. Vřeteník bývá na strojích za účelem využití širšího spektra obráběných průměrů vyměnitelnou částí. Otočným pracovním vřeteníkem je možno obrábět i vnitřní kuželové plochy [3].

Bruska na díry je zobrazena na obrázku 1.10.



Obrázek 1.10 Bruska na díry.

Planetové brusky jsou aplikovány pro broušení děr u rozměrných součástí pravidelného i nepravidelného tvaru. U těchto typů strojů vykonává všechny pohyby nástroj. Jmenovitě rotační pohyb kolem své osy, rotační pohyb kolem průměru a posuvový pohyb ve směru osy otvoru. Planetové uložení může být v provedení svislém, či vodorovném. Provedení svislé je možno použít i pro broušení vnějších rotačních součástí [8].

Hlavním parametrem planetového broušení je excentricita, která je vyjádřitelná vzdáleností mezi osou dutiny a osou brusného vřetene. Díky této excentricitě vykonává nástroj oběžný pohyb jako planeta a odtud tedy přebíráme název pro tento brousicí stroj [8].

Bruska na díry je zobrazena na obrázku 1.11.



Obrázek 1.11 Planetová bruska [16].

#### 1.4.2 Hrotové brusky

Hrotové brusky jsou používány k broušení rotačních součástí, jmenovitě vnějších rotačních, válcových a čelních ploch. Podobně jako brusky na díry slouží převážně k dokončovacím operacím. Obrobek je upínán mezi hroty. U dlouhých součástí bývá podepírán lunetou [2, 4].

Broušení kuželů je umožněno otočně uloženým brousicím vřeteníkem. Pro velmi táhlé kužely bývá taky možné natáčet horní část stolu. Lze využít i speciálního vřetene pro broušení děr [3, 4].

Hrotová bruska je zobrazena na obrázku 1.12.



Obrázek 1.12 Hrotová bruska.

#### 1.4.3 Bezhroté brusky

Podobně jako brusky hrotové jsou bezhroté brusky užívány k broušení vnějších rotačních a čelních ploch. V menší míře potom k broušení ploch vnitřních. Typickým znakem pro tyto brusky je, jak již název napovídá, že nepožadují žádné upínání obrobku [3, 4].

Bezhroté brusky mají dva vřeteníky a tyto oba vřeteníky mají vlastní náhon. Jeden vřeteník je brousicí a má konstantní otáčky. Druhý vřeteník, podávací, má otáčky měnitelné a lze ho přestavit pro požadovaný průměr broušení [2, 4].

Podávací vřeteník bývá otočitelný. Tato skutečnost napomáhá k vytvoření axiálních sil, které vytváří podélný posuv obrobku. Převážné využití těchto brusek bývá v automatickém pracovním cyklu [2, 4].

Vodorovná rovinná bruska je zobrazena na obrázku 1.13.



Obrázek 1.13 Bezhrotá bruska [17].



#### 1.4.4 Rovinné brusky

Charakteristickým znakem rovinných brusek je velký výkon. Lze na nich obrábět hladké a přesné rovinné plochy, úkopy i tvary. Rovinné brusky jsou převážně využívány pro dokončovací operace, při nichž je odebíráno malé množství materiálu, čímž je dosaženo malé drsnosti povrchu a přesného tvaru obrobku. Obrobek je upínán na stůl nejčastěji pomocí elektromagnetických upínačů, nebo pomocí svěráků či upínek [3, 4].

Rovinné brusky můžeme rozdělit na rovinné brusky vodorovné a svislé.

Příznačným rysem vodorovných rovinných brusek je vodorovná osa broušícího vřetene. S takto orientovanou osou bývá broušeno obvodem kotouče, kdy je dosahováno lepší drsnosti povrchu a větší přesnosti, avšak nižšího výkonu broušení. Posuvový pohyb přímočarý vratný nebo otáčivý je vykonáván pracovním stolem, přičemž provedení přímočaré vratné je častější. Převážné využití těchto strojů je v kusové a malosériové výrobě [2, 4].

Kromě rovinných ploch lze na tomto typu stroje s využitím tvarového kotouče obrábět i značně složité profily a vybrušovat před zhotovené tvary ve více rovinách naráz [8].

Vodorovná rovinná bruska je zobrazena na obrázku 1.14.



Obrázek 1.14 Vodorovná rovinná bruska.

Typickou vlastností svislých rovinných brusek je svislá osa broušícího vřetene. S takto orientovanou osou bývá broušeno čelem kotouče, kdy je dosahováno vyšších výkonů broušení, avšak horší drsnosti povrchu a nižší přesnosti. Podobně jako u vodorovné rovinné brusky je i u svislé rovinné brusky posuvový pohyb vykonáván pracovním stolem, přičemž provedení přímočaré vratné je častější než otáčivé. Tyto stroje se obdobně jako brusky vodorovné většinou využívají v kusové a malosériové výrobě [2, 4].

Svislá rovinná bruska je znázorněna na obrázku 1.15.



Obrázek 1.15 Svislá rovinná bruska [18].

#### 1.4.5 Speciální brusky

Do této kategorie spadají brusky se speciálním využitím. Hlavními představiteli jsou ostříčky nástrojů. Dále sem patří brusky pro broušení ozubení a závitů, klikových a vačkových hřídelí či brusky dvoukotočové [2, 4].

Bruska na ostření soustružnických nožů je zobrazena na obrázku 1.16.



Obrázek 1.16 Bruska na ostření soustružnických nožů.

Dvoukotoučová bruska je znázorněna na obrázku 1.17.



Obrázek 1.17 Dvoukotoučová bruska.

### 1.5 Přesnost a drsnost obráběné plochy

Broušení bývá přednostně využíváno jako dokončovací metoda, tudíž je požadována odpovídající kvalita obrobených ploch a jejich přesnost. U broušení se tyto parametry odvíjí především od vlastností brousicích kotoučů, řezných podmínek a způsobu broušení, tuhosti a přesnosti brusky [3].

Drsnost povrchu, v tomto případě charakterizovaná střední aritmetickou úchylkou profilu  $R_a$ , a přesnost rozměrů vyjádřena stupněm přesnosti IT.

Pro jednotlivé typy broušení je přesnost a drsnost uvedena v tabulce 1.2.

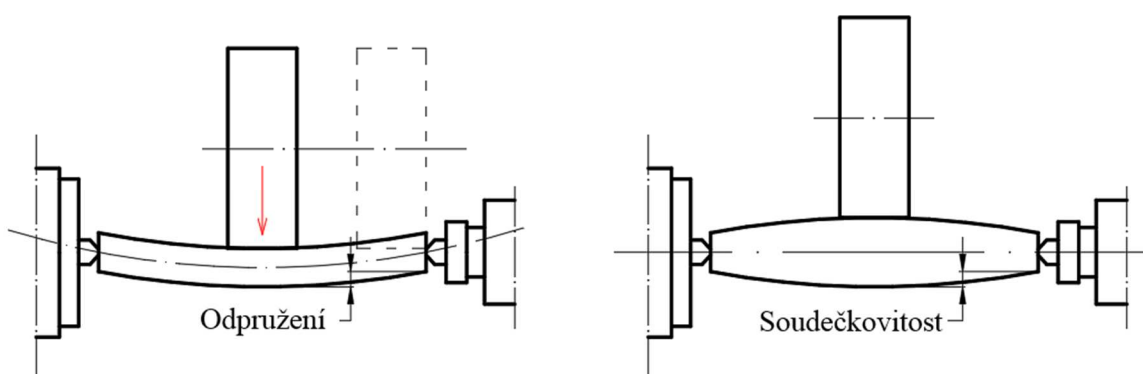
Tabulka 1.2 Drsnost a přesnost ploch obrobených broušením [2, 3, 4].

Tvar broušené plochy	Způsob broušení	Přesnost rozměrů IT [-]	Drsnost obrobené plochy $R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]
Rovinná	Hrubování:		
	- čelem nástroje	9 až 11	0,8 až 6,3
	- obvodem nástroje	8 až 11	0,8 až 3,2
	Broušení na čisto:		
	- čelem nástroje	5 až 7	0,2 až 1,6
	- obvodem nástroje	5 až 7	0,2 až 1,6
	Jemné broušení	3 až 5	0,025 až 0,4

Tvar broušené plochy	Způsob broušení	Přesnost rozměrů IT [-]	Drsnost obrobené plochy $R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]
Vnitřní válcová	Hrubování:	9 až 11	1,6 až 3,2
	Broušení na čisto	5 až 7	0,4 až 1,6
	Jemné broušení	3 až 6	0,05 až 0,4
Vnější válcová	Hrubování	9 až 11	1,6 až 3,2
	Broušení na čisto	5 až 7	0,4 až 1,6
	Jemné broušení	3 až 6	0,025 až 0,4

Velký význam z hlediska kvality povrchu má kromě drsnosti i jeho vlnitost. Jedná se o soubor periodických a neperiodických prohlubenin a výstupků. Vliv na tvorbu vlnitosti má především pracovní pohyb obrobku a broušícího vřeteníku, potom méně obvodová rychlost broušícího kotouče, počet jeho záběrů a fázový posun při dalším záběru broušícího kotouče [1].

U obvodového broušení válcových součástí můžeme pozorovat soudečkovitost součástí. K tomuto jevu dochází díky vlivu odpružení materiálu. Kotouč je přitlačen silou na obrobek a ten ve svém středu má větší výchylku než na upnutých krajích. Tato skutečnost může být odstraněna více přechody broušícího nástroje po obrobku nebo podepřením pomocí lunety vprostřed obrobku. Soudečkovitost při broušení je zobrazena na obrázku 1.18 [5].



Obrázek 1.18 Soudečkovitost obrobku při broušení do kulata [5].



## 2 TECHNOLOGICKÉ APLIKACE BROUŠENÍ

Brousící proces můžeme rozdělit pomocí čtyř hlavních kritérií:

- Dělení podle tvaru obrobeného povrchu a způsobu jeho vytvoření:
  - broušení do kulata,
  - rovinné broušení,
  - broušení na otáčivém stole (rotační posuv),
  - tvarové broušení (broušení ozubených kol, závitů, aj.),
  - kopírovací broušení (NC a CNC stroje),
  - broušení tvarovými brousícími kotouči (profil kotouče je profilem obrobku) [2, 3, 4].
- Dělení dle hlavního pohybu (posuvu) stolu vzhledem k brousícímu kotouči:
  - radiální broušení,
  - tangenciální broušení,
  - axiální broušení,
  - čelní zapichovací broušení (plynulý axiální posuv stolu),
  - obvodové zapichovací broušení (plynulý radiální posuv stolu) [2, 3, 4].
- Dělení podle vzájemné polohy brousícího kotouče a obrobku:
  - vnější broušení,
  - vnitřní broušení [2, 3, 4, 5].
- Dělení podle aktivní části brusného kotouče:
  - čelní broušení,
  - obvodové broušení [2, 3, 4].

### 2.1 Vnitřní obvodové broušení do kulata

Při vnitřním obvodovém broušení do kulata dochází k otáčivému pohybu obrobku a brousícího kotouče (tyto komponenty se otáčí v opačném smyslu vůči sobě), jejich přísluvu do řezu (přisouvá se buď kotouč, nebo obrobek) a podélnému vratnému pohybu [2].

Je snaha obrobit obrobek na jedno upnutí, tudíž je provedeno jak hrubování, tak broušení na čisto. Při broušení musí brousící kotouč být plně zanořen v díře, jinak dochází ke kuželovitému zvětšení ústí otvoru [8].

Při vnitřním broušení je nutno dodržovat tyto zásady:

- Průměr brousícího kotouče je volen v rozmezí  $\frac{3}{4}$  až  $\frac{4}{5}$  průměru díry. Nesmí ovšem přesahovat  $\frac{9}{10}$  průměru díry [2, 3, 4, 6].
- Jsou voleny měkčí kotouče s menší trvanlivostí a častějším orovnáváním [4].
- Nástavec pro broušení hlubokých otvorů je dlouhý a tenký, proto nebývá tuhý a je tedy nutno brousit s malými přísluvy a více záběry [2].

- Nutnost intenzivního chlazení procesní kapalinou z důvodu zahřívání součásti vlivem velkých stykových ploch [2, 4].
- Pro různé průměry otvorů se volí různé průměry vřeten, které jsou konstruována co nejkratší a nejtlustší pro zachování tuhosti obráběcí soustavy [4].

Volené řezné rychlosti  $v_c$  jsou pro křehké materiály v rozmezí  $10$  až  $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  a pro houževnaté v rozmezí  $25$  až  $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  [4, 8].

Obvodové rychlosti obrobku v závislosti na druhu materiálu jsou voleny:

Tabulka 2.1 Tabulka obvodových rychlostí obrobku vnitřního broušení [8].

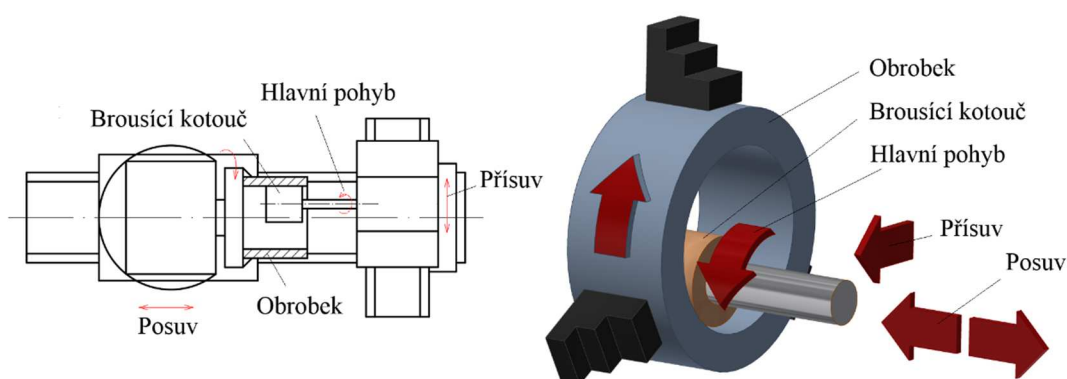
Materiál	Obvodová rychlost obrobku $v_w$
Hliník	$0$ až $40 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$
Mosaz	$24$ až $30 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$
Šedá litina	$19$ až $24 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$
Oceli	$16$ až $24 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

Pro hrubovací broušení je volen přísuv  $0,01$  až  $0,02 \text{ mm}$  a podélný posuv  $0,2$  až  $0,7 \frac{\text{šířka kotouče}}{\text{otáčka}}$ . Pro broušení na čisto je volen přísuv  $0,002$  až  $0,01 \text{ mm}$  a podélný posuv  $0,2$  až  $0,4 \frac{\text{šířka kotouče}}{\text{otáčka}}$ . Posuvy a přísuvy jsou voleny v závislosti na obráběném materiálu [4, 8].

Otvory můžeme brousit axiálně, zapichováním či planetově.

### 2.1.1 Vnitřní otvorové axiální broušení

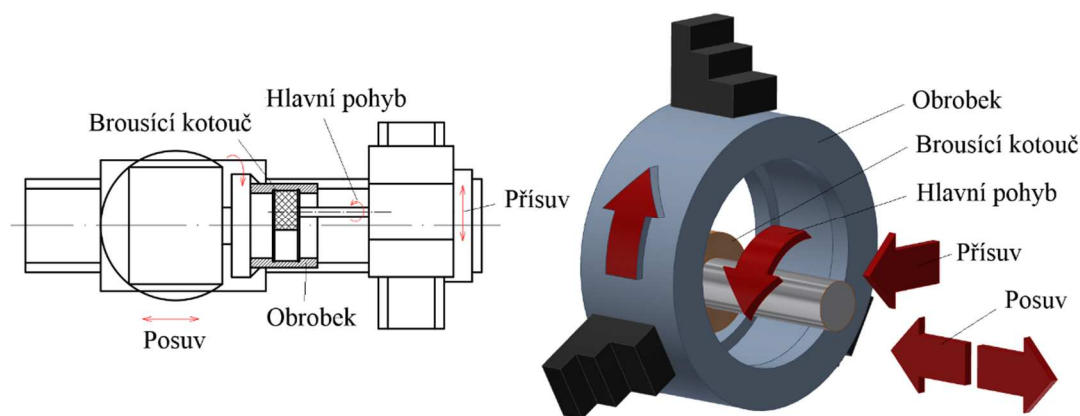
Podélný (axiální) způsob broušení otvorů je nepoužívanější. Brousící kotouč se volí co nejširší a nejprve se začne hrubováním. V hrubování se odebere největší část přídavku. Následuje ovrhnutí kotouče, po kterém se otvor brousí na čisto. Pro menší otvory jsou voleny menší přísuvy. Pro otvory s požadavkem na vysokou přesnost se obrábí na čisto na více záběrů. Axiální broušení je zobrazeno na obrázku 2.1 [2, 6, 8].



Obrázek 2.1 Vnitřní otvorové axiální broušení [1, 2, 4, 7].

### 2.1.2 Vnitřní otvorové radiální broušení

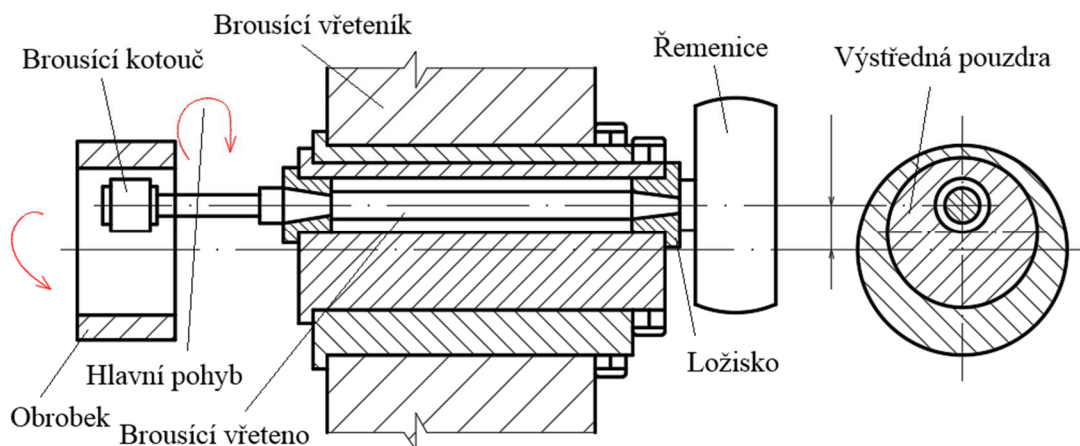
Zapichovací způsob je využíván méně často, z důvodu nutnosti vysoké tuhosti obráběcí soustavy. Je dosahováno vyšších výkonů při broušení kratších děr (kotouč by měl být o něco širší, než je délka díry). U zapichovacího způsobu není využíváno posuvu, vyjma uvedení do potřebné polohy, a obrábí se pouze přísuvem do řezu. Hodnoty těchto přísuvů jsou zhruba poloviční oproti axiálnímu způsobu. Tímto způsobem je možno obrábět válcové průřezy děr, válcové a čelní plochy osazení a vnitřních drážek. Je možno dosahovat delší trvanlivosti kotouče a lepší jakosti povrchu obrobku pomocí krátkého oscilačního podélného pohybu. Radiální (zapichovací) způsob broušení je znázorněn na obrázku 2.2 [8].



Obrázek 2.2 Vnitřní otvorové zapichovací broušení [8].

### 2.1.3 Vnitřní otvorové planetové broušení

Planetové broušení děr se používá pro broušení otvorů na součástech, kde nelze obrobek upnout běžným způsobem. Obrobek se upíná nehybně na stole brusky a všechny pracovní pohyby jsou vykonávány brousicím vřetenem. Vřeteno se otáčí kolem své osy, současně obíhá kolem osy obrobku a zároveň vykonává posuvný pohyb do směru osy otvoru. Planetové brusky mívají menší přesnost vlivem menší tuhosti obráběné soustavy díky vyložení vřetena, které často bývá značné. Schéma planetového broušení je vidět na obrázku 2.3 [2, 4, 6, 8].



Obrázek 2.3 Schéma planetového broušení děr [1, 2, 8].

## 2.2 Vnější obvodové broušení do kulata

Při vnějším obvodovém broušení do kulata je využíváno obdobných pohybů jako u vnitřního otvorového broušení, s tím rozdílem, že přísuv do řezu vykonává pouze brousící kotouč (viz. Kapitola 2.1). Podélný vratný pohyb je vykonáván převážně obrobkem, pokud se nejedná o součást s velikou hmotností [2].

Vnější obvody obrobků lze brousit mezi hroty a bez hrotů. Kde mezi hroty brousíme axiálně (podélně), hloubkově a radiálně (zapichování) a bezhroté broušení dělíme na broušení průběžné a radiální (zapichovací) [3].

### 2.2.1 Vnější obvodové axiální broušení

Podélný (axiální) způsob broušení je využíván u obrobků, kde pracovní délka broušení je větší, než šíře brousícího kotouče. Obrobky zpravidla bývají součásti válcového či kuželového tvaru. Pro dlouhé a úzké obrobky je využívána k jejich podepření luneta [2, 4, 8].

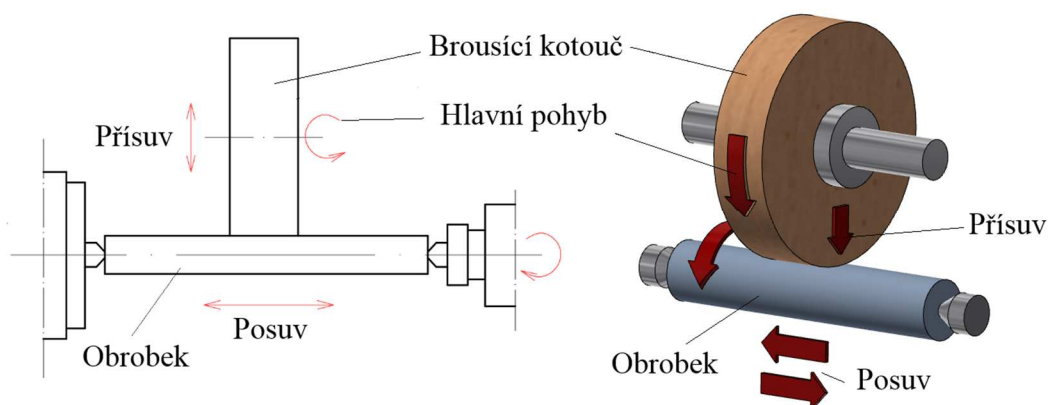
Pro křehké materiály (litiny) je volena řezná rychlost  $v_c$  v rozmezí  $20$  až  $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  a pro houževnaté (oceli) v rozmezí  $25$  až  $35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  [2, 4, 8].

Obvodové rychlosti obrobku v závislosti na druhu materiálu jsou voleny:

Tabulka 2.2 Tabulka obvodových rychlostí obrobku vnějšího broušení [2, 4].

Materiál	Obvodová rychlost obrobku $v_w$
Hliník a slitiny hliníku	$20$ až $30 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$
Litiny	$12$ až $22 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$
Oceli	$8$ až $20 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

Pro hrubovací broušení je volen přísuv  $0,004$  až  $0,008 \text{ mm}$  a podélný posuv  $0,6$  až  $0,85 \frac{\text{šířka kotouče}}{\text{otáčka}}$ . Pro broušení na čisto je volen přísuv  $0,001$  až  $0,004 \text{ mm}$  a podélný posuv  $0,2$  až  $0,5 \frac{\text{šířka kotouče}}{\text{otáčka}}$ . Posuvy a přísuvy jsou voleny v závislosti na obráběném materiálu. Vnější axiální broušení je zobrazeno na obrázku 2.4 [2, 4, 8].

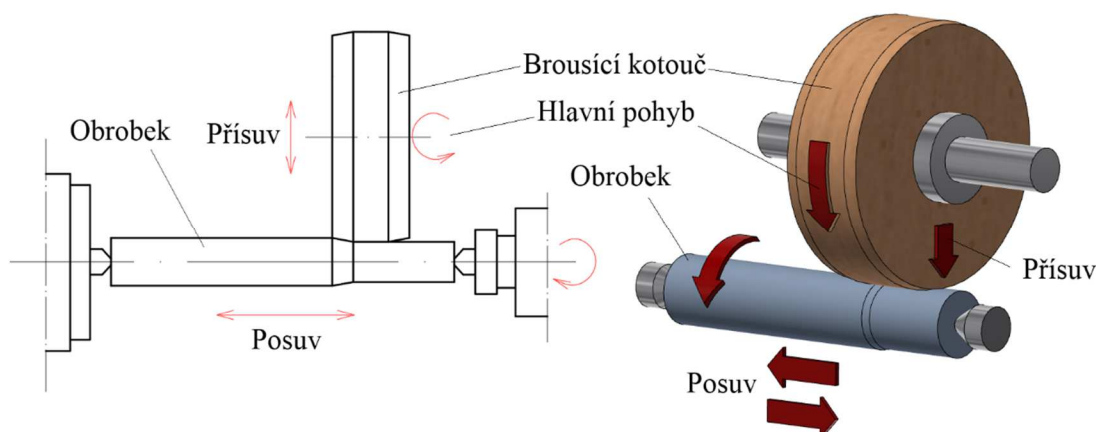


Obrázek 2.4 Vnější obvodové axiální broušení [1, 2, 4, 7].

### 2.2.2 Vnější obvodové hloubkové broušení

Pro hloubkové broušení jsou voleny malé přídavky. Jedná se o jednu z nejproduktivnějších metod vnějšího obvodového broušení. Brousící kotouč je nastaven na konečný rozměr součásti a přídavek je odebrán na jeden podélný zdvih s konstantním pracovním záběrem. Větší produktivity je dosaženo kuželovým zkosením brousícího kotouče a to buď pod zhruba  $2^\circ$  úhlem, či stupňovitě při větších hodnotách přídavku. Při hloubkovém broušení je dosahováno lepšího výkonu než při podélném způsobu, a to o 25 % až 75 %, a vzniká úspora strojního času v rozmezí 30 % až 70 % [2, 4, 6, 8].

Hloubkové broušení je znázorněno na obrázku 2.5.

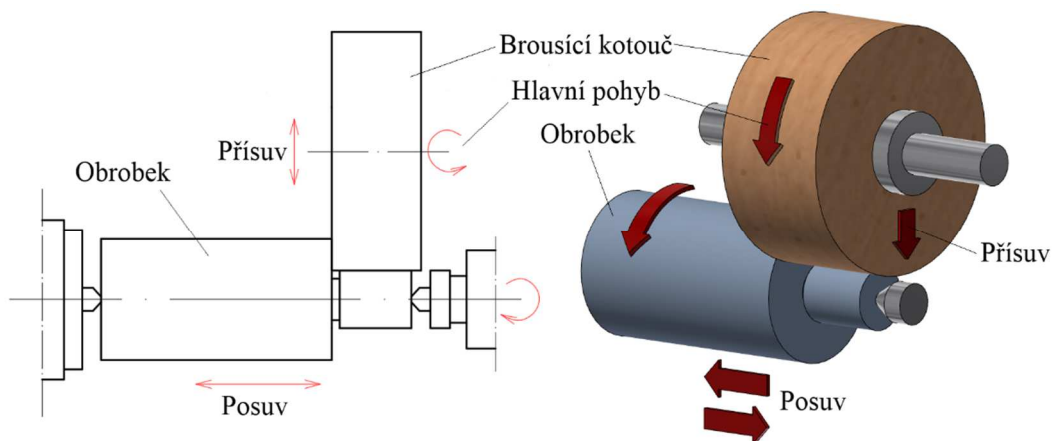


Obrázek 2.5 Vnější obvodové hloubkové broušení [1, 2, 4].

### 2.2.3 Vnější obvodové radiální broušení

Radiální (zapichovací) broušení je jedna z nejproduktivnějších metod broušení. Brousící kotouč musí být větší než obráběná plocha. Obrobek by měl být krátký a tuhý. Touto brousící metodou je možno brousit tvarové plochy. Pro současné broušení čela a válcové plochy je využíváno šikmého přísuvu. Při radiálním broušení je dosaženo o 40 % až 80 % lepšího výkonu než při broušení podélném [2, 4, 8].

Radiální broušení je vyobrazeno na obrázku 2.6.

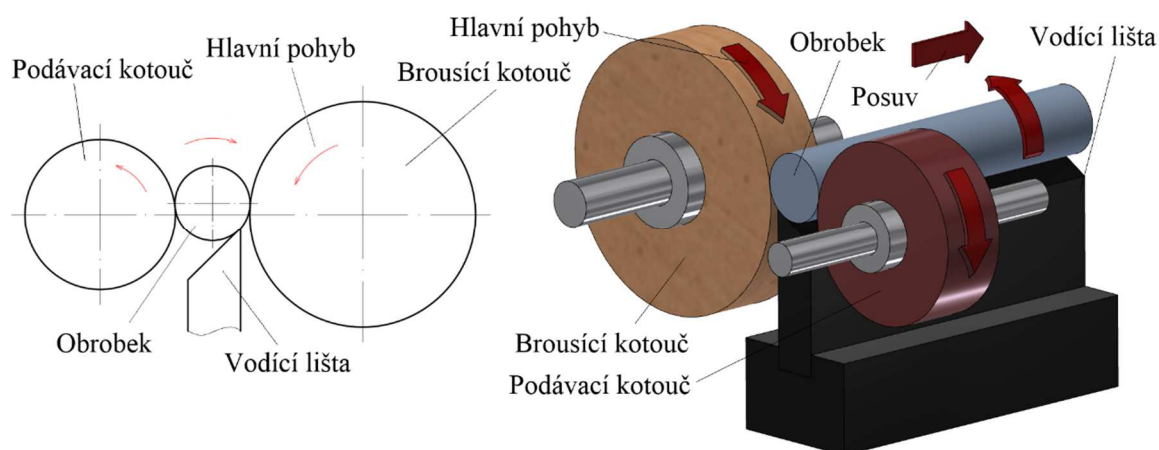


Obrázek 2.6 Vnější obvodové radiální (zapichovací) broušení [1, 2].

### 2.2.3 Vnější obvodové bezhroté broušení průběžné a radiální

Bezhrotým broušením dosahujeme vysoké produktivity při zapichovacím i průběžném způsobu broušení. U této metody je využíváno podávacího kotouče a vodících lišt s opěrným pravítkem, čímž odpadá nutnost upínat mezi hroty. Vodicí lišty bývají kalené a jsou využívány k dosažení požadovaného tvaru součásti. Jejich délka bývá větší než šíře brousícího kotouče. Typickým příkladem broušených součástí bezhrotým broušením jsou součásti valivých ložisek. Nedochází k průhybu obrobků a stačí pouze nevelký přídavek na broušení. U průběžného způsobu je osa obrobku nadsazena nad osami podávacího a brousícího kotouče o 5 až 30 mm. Podávací kotouč je ustavený pod úhlem a tím je vytvořena axiální síla, která uděluje součásti posuvový pohyb, a radiální síla, kterou je obrobek otáčen příslušnými otáčkami. Řezná rychlost  $v_c$  je 30 až 35  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ , obvodová rychlost  $v_w$  je 18 až 45  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  a radiální záběr  $a_e$  je 0,005 až 0,300 mm [2, 4, 8].

Vnější obvodové bezhroté broušení průběžové je znázorněno na obrázku 2.7.



Obrázek 2.7 Vnější obvodové bezhroté broušení [1, 2, 4, 7].

Na rozdíl od průběžného broušení se u bezhrotého radiálního broušení do pracovního prostoru součásti vkládají jednotlivě. Součásti se v pracovním prostoru otáčejí, ale neposouvají. Tato metoda je využívána pro součásti s nákrůžky, souosými válcovými plochami, či kuželovými a tvarovými plochami, které nemají středící důlky [51, 21].

## 2.3 Vnější rovinné broušení

Rovinné broušení je převážně používáno jako dokončovací operace po hrubovacích operacích frézováním, obrážením a hoblováním. Brousí se buď obvodem, nebo čelem brousícího kotouče [2, 4].

### 2.3.1 Vnější rovinné broušení obvodem kotouče

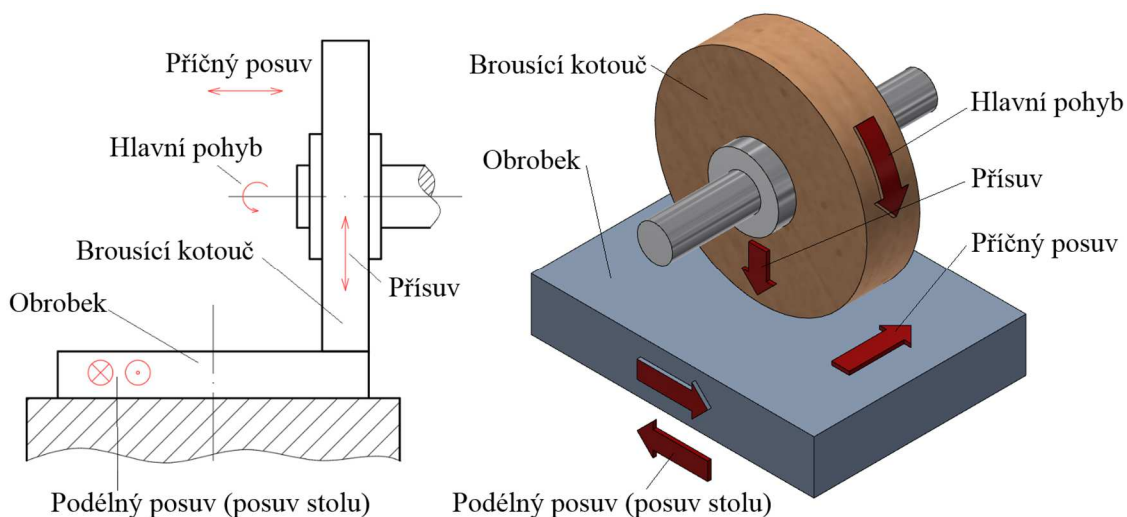
Při broušení obvodem kotouče dosahujeme menších výkonů než při broušení čelem kotouče, zato je dosahováno vyšší přesnosti a kvalitnějšího povrchu. Při obvodovém broušení dochází pouze k nepatrné deformaci teplem vlivem minimálního ohřevu součásti díky úzkému brousícímu kotouči. Hlavní řezný pohyb je vykonáván nástrojem, vedlejší posuv koná obrobek a ten zpravidla bývá přímočarý, či otáčivý. Plocha se přebrousí celá axiálně



a následně se přidává radiální přídavek do té doby, než je odebrán celý přídavek na broušení [2, 4, 8].

Otáčivým pohybem bývají obráběny přesné čelní plochy [4].

Vnější rovinné broušení obvodem nástroje je znázorněno na obrázku 2.8.

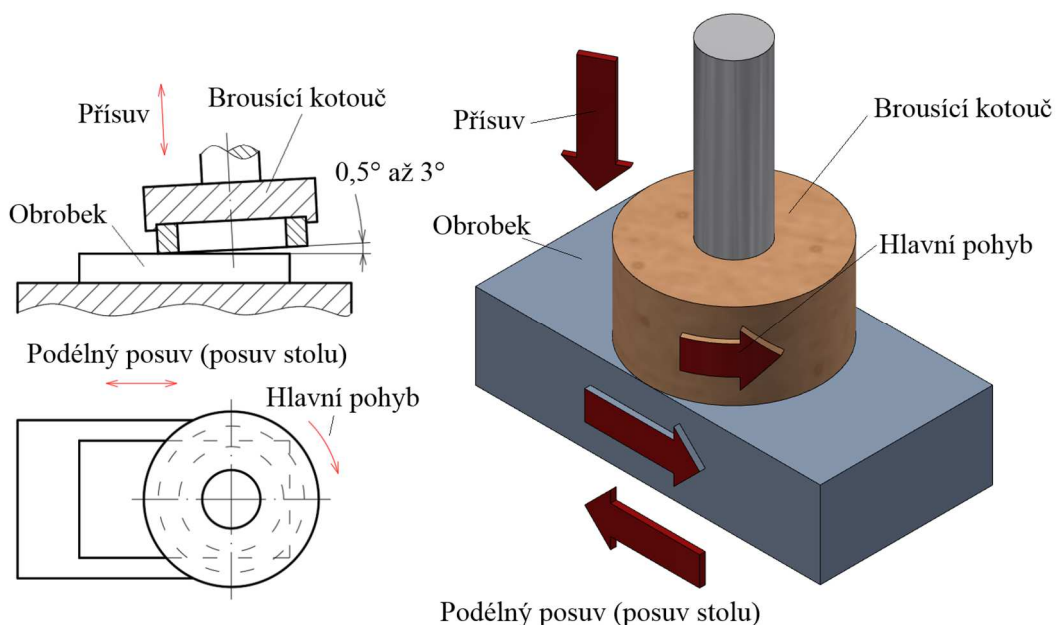


Obrázek 2.8 Broušení rovinné plochy obvodem kotouče [1, 2, 4, 7].

### 2.3.2 Vnější rovinné broušení čelem kotouče

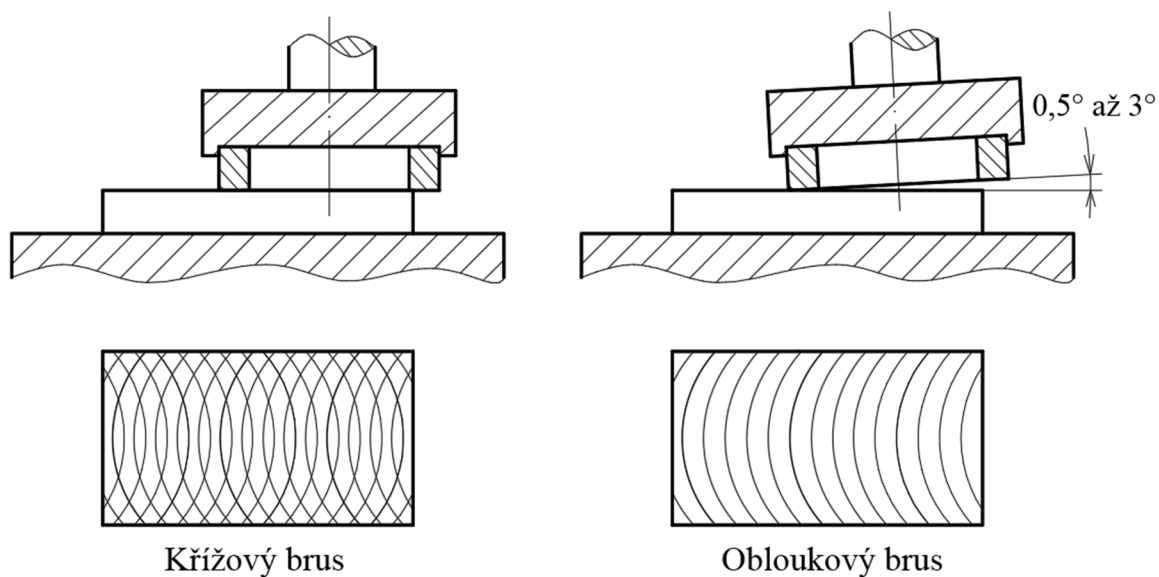
Obrábění čelem frézy je výkonnější než obvodové, vzhledem k většímu styku materiálu s nástrojem. Podobně jako u obvodového broušení vykonává řezný pohyb brousící kotouč a obrobek koná přímočarý, či otáčivý pohyb. [2, 4].

Vnější rovinné broušení čelem nástroje je zobrazeno na obrázku 2.9.



Obrázek 2.9 Broušení rovinné plochy čelem nástroje [1, 2, 4, 7].

Brousící kotouč bývá zpravidla nakloněn, aby docházelo k omezení vzniku tepla. Pro dokončování je vřeteno nastaveno kolmo k zajištění kvalitnějšího povrchu vlivem zachování stopy oběma konci nástroje a zajištění přesnější rovinnosti viz obrázek 2.10 [2, 4].



Obrázek 2.10 Pracovní plocha po čelním rovinném broušení [8].



### 3 BRUSNÉ CNC CENTRUM HAUSER H45-400

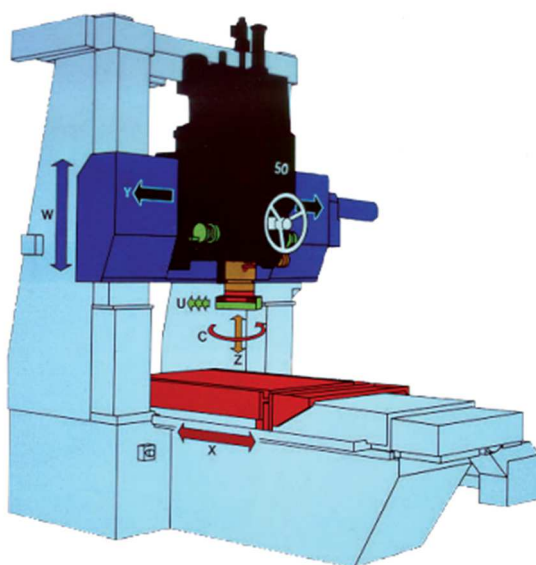
Stroj, který bude využit k broušení děr a tvarových prvků na výrobních součástech v této práci, je brusné CNC centrum Hauser H45-400 od výrobce Kellenberger, jež je dceřinou společností v Hardinge group. Tento stroj je zobrazen na obrázku 3.1.



Obrázek 3.1 Brusné centrum Hauser H45-400..

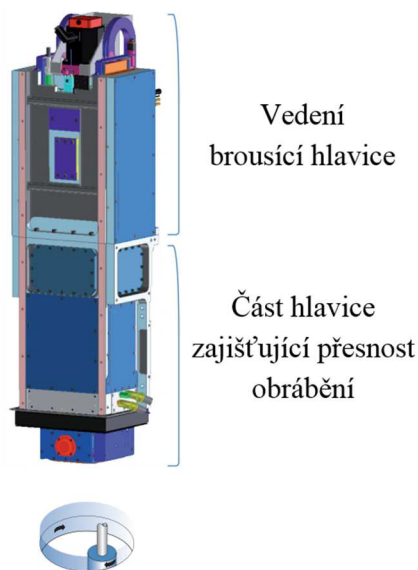
#### 3.1 Kinematika stroje H45-400

Brousicí centrum od výrobce Hauser je vybaveno pojezdy v klasických osách X, Y, Z, kde pro osy Y a Z jsou ještě uzpůsobeny dodatečné pojezdy v osách U a W. Pohyb osy Z je uskutečněn brousicí hlavicí a pohyb v ose W je prováděn pojezdem po vedení stroje. Obdobně jsou pojezdy uskutečněny v osách Y a U, kde pojezd osy Y se pohybuje po vedení stroje a osa U pohybuje brousicí hlavicí. Kinematika brousicího centra je znázorněna na obrázku 3.2.



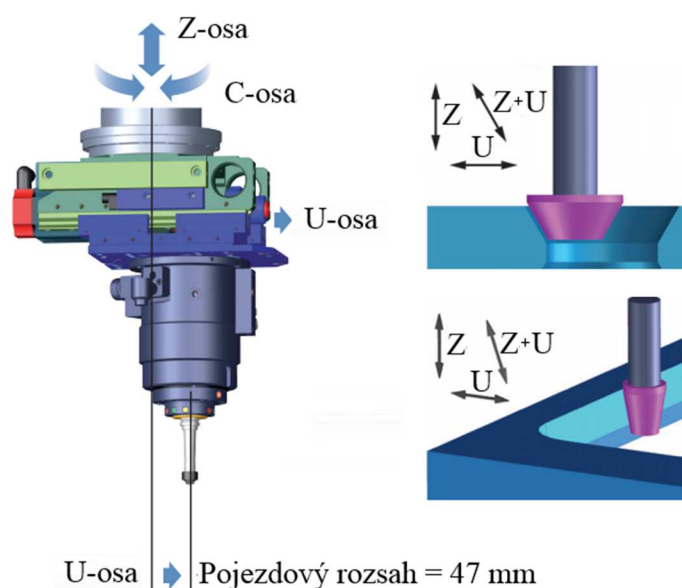
Obrázek 3.2 Kinematika stroje Hauser H45-400 [9].

U stroje Hauser H45-400 byla vyvinuta nová brousicí hlavice. Tato hlavice zajišťuje prvotřídní tuhost a pevnost soustavy a vede k udržení celkového obráběcího času a zkrácení času vyjiskřování na polovinu. Dále umožňuje kombinování broušení s tvrdým frézováním. Značný nárůst rychlosti a frekvence zdvihu vede k snížení strojního času obráběcího cyklu. Systém hydrostatického vedení vřetenových ložisek dovoluje dosahovat přesnosti kruhovitosti  $\pm 0,5 \mu\text{m}$  při planetovém broušení. Brousicí hlavice je znázorněna na obrázku 3.3 [9].



Obrázek 3.3 Brousicí hlavice stroje Hauser H45-400 [9].

Vysoký rozsah U-osy u stroje Hauser H45-400 až  $+47 \text{ mm}$  zvyšuje funkční samostatnost broušení. U stroje je také možné automatizované broušení kuželů pomocí Z-U-osy [9]. Detailní znázornění kinematiky brousicí hlavice je na obrázku 3.4.



Obrázek 3.4 Detailní pohled na kinematiku u brousicí hlavice [9].

### 3.2 Požadavky stroje pro vysokou přesnost

Jedním ze základních předpokladů, aby stroj dosahoval vysoké přesnosti, je vysoká tuhost jeho soustavy a odolnost vůči deformování. Dále je zapotřebí stroj konstruovat s ohledem na tepelnou stabilitu soustavy [9].

Konstrukce sjezdových vedení a lineárního vedení zohledňuje co nejplynulejší změnu zdvihu. Umístění měřicího systému stroje je optimálně polohováno s ohledem na způsobu měření. Osově pohony jsou umístěny v místě středu tření, viz obr. 3.5 [9].

Vedení stroje v osách X a Y je provedeno s využitím dotykových kluzných vodičků. Přílnavost ve vedení eliminuje tlakový mazací systém, viz obr. 3.5 [9].

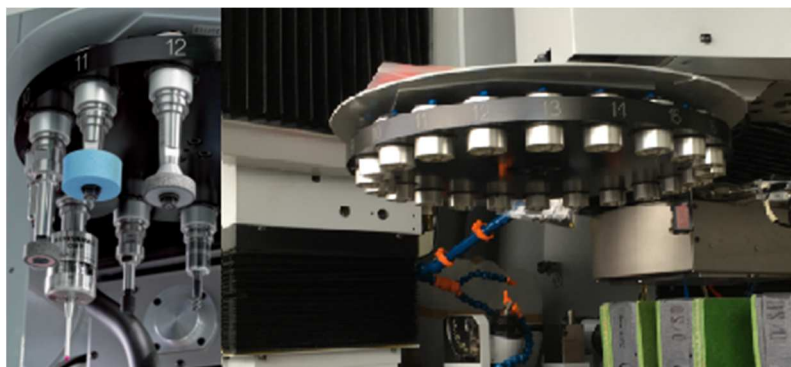


Obrázek 3.5 Vedení ve stroji Hauser H45-400 [9].

Hauser H45-400 disponuje uživatelsky přívětivým rozhraním pro ovládání, založeném na ISO/DIN programování. Osy X, Y, C, U, Z a W jsou CNC ovládány. Stroj je vybaven softwarem Hauser software cycles, založeným na systému Fanuc 300i, který zaručuje, že ovládání perfektně zajišťuje všechny potřeby planetového obrábění [9].

### 3.3 Doplnky a příslušenství brusného centra

Brusné centrum Hauser H45-400 je vybaveno automatickým zásobníkem nástrojů. Tento zásobník má 12 pozic, což dovoluje automatickou práci stroje s variací brousicích kotoučů od průměru 3 mm po průměr 50 mm (alternativně s rozsahem od 0,3 mm po 5 mm). Zásobník je vyobrazen na obrázku 3.6 [9].



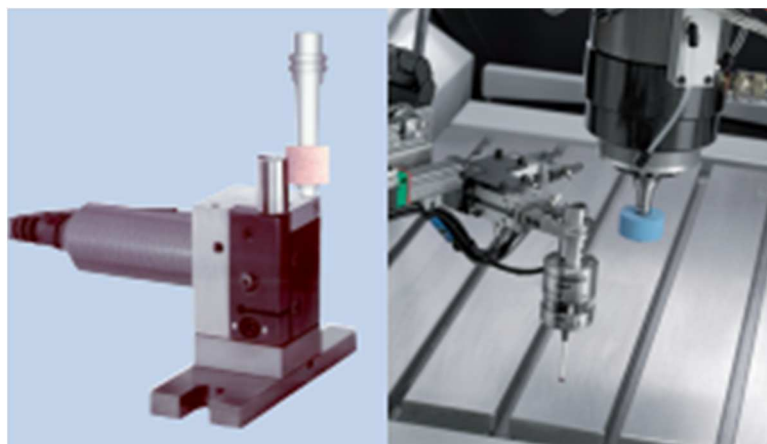
Obrázek 3.6 Automatický zásobník nástrojů u stroje Hauser H45-400 [9].

Dále je stroj vybaven pohonným motorem 70S ATC, který má široké spektrum záběru a to od 9 000 po 70 000 otáček za minutu. Tento moderní pohon je ideálním doplňkem stroje pro absolutní využití automatického výměnného zásobníku nástrojů. Motor je znázorněn na obrázku 3.7 [9].



Obrázek 3.7 Pohonný motor 70S ATC [9].

Mezi další vybavení stroje patří multi-senzorový systém pro automatické potlačení „broušení naprázdno“ a kalibrování brousicích kotoučů. Dále je možno využít měřicích sond pro automatizování a zrychlení procesu broušení, bez zbytečného zastavování obrábění. Tato příslušenství jsou na obrázku 3.8 [9].



Obrázek 3.8 Příslušenství ke stroji Hauser H45-400 [9].

### 3.4 Technická data stroje

Parametry a technická data stroje jsou uvedena v tabulce 3.1.

Tabulka 3.1 Parametry stroje Hauser H45-400 [9].

<b>Pracovní oblast stroje</b>	
Rozsah nastavení X, Y	700 × 500 mm
Vertikální nastavení brousící hlavy (W)	500 mm
Vzdálenost mezi povrchem stolu a nosící deskou pro pohon U-osy	max. 785 mm
Vzdálenost mezi svislými sloupci	750 mm
Brousitelný průměr v planetárním režimu s brousícím kotoučem $\varnothing 50$ mm/70S:	
Pohon U-osy 70S ve středové poloze, automatický brousící mód	max. 144 mm
Pohon U-osy 70S s přídavnými deskami, polo-automatický brousící mód	max. 360 mm
Kuželové broušení, zahrnutý úhel (divergentní a konvergentní)	max. 120°
<b>Pracovní stůl</b>	
Pracovní prostor	770 × 630 mm
Povolené zatížení stolu	max. 500 kg
<b>Posuvy</b>	
Stůl a sedlo X, Y, W	
Pracovní posuv	0 až 2000 mm·min <sup>-1</sup>
Rychlost pojezdu	4000 mm·min <sup>-1</sup>
<b>Brusné vřeteno Z, C, U</b>	
Doporučená brousící rychlost vřetene: elektrický motor 70S, plynule nastavitelné a programovatelné	9'000 až 70'000 min <sup>-1</sup>
C-osa Planetový režim, plynule nastavitelné a programovatelné	5-350 min <sup>-1</sup>
Z-osa střídavý zdvih, plynule nastavitelné	0,500 až 22'000 mm·min <sup>-1</sup>
Z-osa zdvihová frekvence	max. 8 Hz
Z-osa délka zdvihu, plynule nastavitelné	0,1 až 170 mm
Radiální posuvová kapacita U-osy (CNC režim)	-3 až +47 mm
<b>Přesnost</b>	
Nepřesnost nastavení pozice os X, Y, W, odpovídající VDI/DGQ 3441	0,0025 mm

## 4 ANALÝZA OBRÁBĚNÝCH SOUČÁSTÍ A VÝBĚR NEJVHODNĚJŠÍCH METOD OBRÁBĚNÍ

V této kapitole je analyzován způsob výroby různých typů otvorů a děr součástí s vysokou přesností a kvalitou drsnosti povrchu daných součástí. Výroba probíhá v kusových výrobních dávkách na nástrojárně, takže je brán především ohled na splnění předepsaných rozměrů a tolerancí na výrobních výkresech. Bylo vybráno 10 typových součástí. Výrobní výkresy jsou přiloženy v přílohách a součásti jsou značeny čísla DP-161502-SČ-X, kde X je pořadí součásti.

### 4.1 Rozbor konstrukcí a materiálů obráběných součástí

Z hlediska materiálu se jedná o součásti podléhající různým typům zatížení a je zde nutnost zajistit správnou funkci dosedacích a funkčních ploch, je tedy u všech součástí předepisováno tepelné zpracování od kalení, přes cementování, po zušlechťování.

U těchto 10 vybraných součástí se vyskytují v následujících větách popsané předepsané materiály. Pro kalení a cementování je využita konstrukční nízkolegovaná ocel 14 220 (16MnCr5). Pro součásti pouze kalené je využita u jedné součásti ocel středně legovaná 17 024 (X39Cr13), dále jsou pak u dalších součástí využity nástrojové oceli legované 19 312 (90MnCrV8), 19 437 (X210CrW12), 19 487 (21MnCr5). Pro zušlechťované součásti byla u jedné součásti opět využita ocel 14 220 (16MnCr5), podobně jako u součástí cementovaných, a u druhé konstrukční ocel nízkolegovaná 15 142 (42CrMo4).

Z hlediska konstrukce součástí zohledňujeme především přesnost a drsnost obráběných otvorů a děr. Drsnosti jsou na výkresech součástí předepisovány střední aritmetickou úchylkou profilu  $R_a$ , což je střední aritmetická hodnota absolutních hodnot úchylek profilu v rozsahu základní délky, a to v hodnotách 0,4 až 0,8  $\mu\text{m}$ .

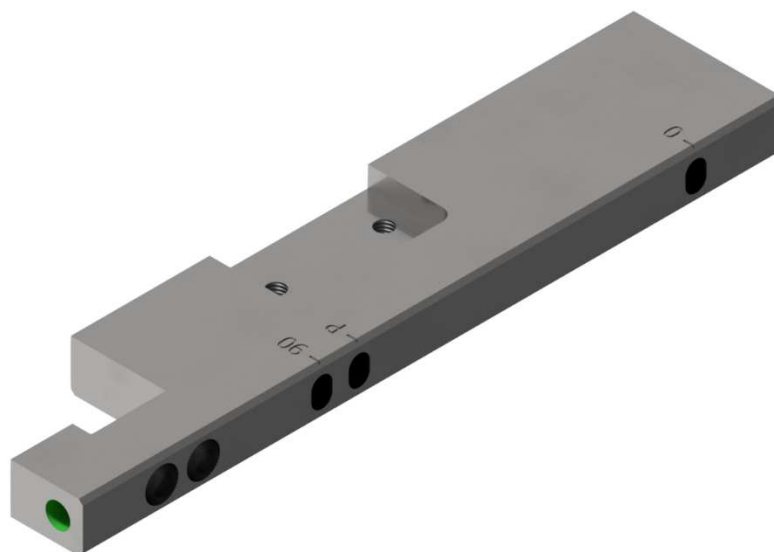
Co se týče obráběných tvarů a rozměrů, potýkáme se u součástí především s rozměry menšími a to od 3 do 10 mm, výjimečně s rozměry většími 28 mm a 96 mm. Většina rozměrových tolerancí je umístěna v tolerančním poli H7, vyjma pár otvorů, u kterých se potýkáme buď s tolerancemi F8, G7, H8, nebo tolerancemi předepsanými normou ISO 2768-mK.

Nejčastěji předepsané geometrické tolerance jsou tolerance na přesnost polohy a kruhovitosti. U jedné součásti je předepsána geometrická tolerance kolmosti a rovnoběžnosti.

Technické výkresy jednotlivých součástí, pro přehlednost zjednodušené, uvádějící pouze obráběné otvory a informace k těmto obráběným prvkům, jsou uvedeny k práci jako přílohy, označené čísly 1 až 10.

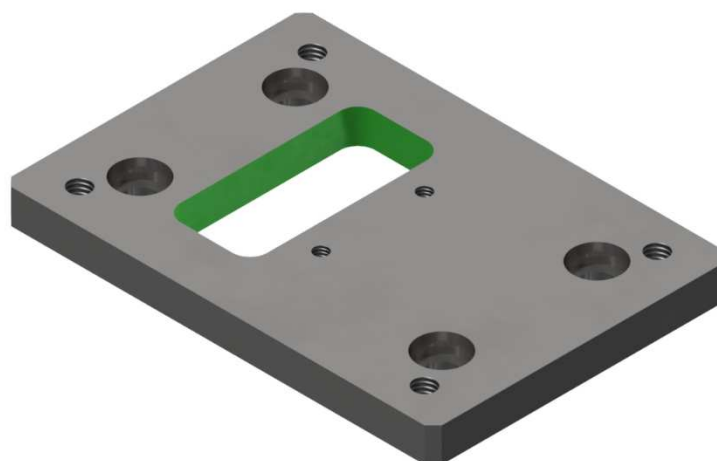
### 4.2 Přehled obráběných součástí

Součást č. DP-161502-SČ-01, technický výkres v příloze č. 1, je vyrobena z materiálu 14 220 (16MnCr5) a je tepelně zpracována kalením a tvrdost 56 HRC a cementována do hloubky 0,6 mm. U součásti je dokončován otvor 6 mm s předepsanou tolerancí H7 a drsností povrchu  $R_a = 0,8 \mu\text{m}$ . Přesnost polohy tohoto otvoru na čele je s tolerancí  $\pm 0,1 \text{ mm}$ . Součást je zobrazena na obrázku 4.1.



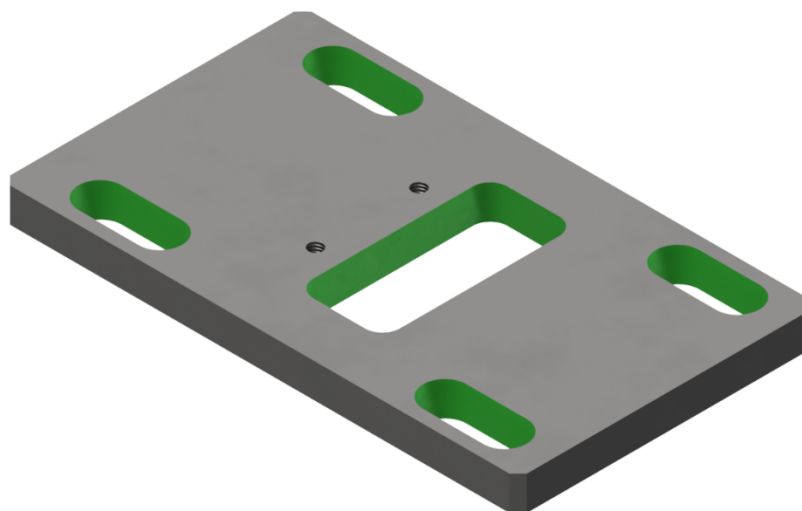
Obrázek 4.1 Součást DP-161502-SČ-01.

Součást č. DP-161502-SČ-02, technický výkres v příloze č. 2, je vyrobena z materiálu 19 437 (X210CrW12) a je tepelně zpracována kalením na tvrdost 60 HRC. U součásti je dokončován otvor  $20 \times 45$  mm s předepsanou drsností povrchu  $R_a = 0,8 \mu\text{m}$ . Přesnost polohy tohoto otvoru na čele podléhá toleranci podle normy ISO 2768-mK. Součást je znázorněna na obrázku 4.2.



Obrázek 4.2 Součást DP-161502-SČ-02.

Součást č. DP-161502-SČ-03, technický výkres v příloze č. 3, je vyrobena z materiálu 19 437 (X210CrW12) a je tepelně zpracována kalením na tvrdost 60 HRC. U součásti je dokončován otvor  $20 \times 45$  mm a  $14 \times 10^{+0,1}_{+0,05}$  mm s předepsanou drsností povrchu  $R_a = 0,8 \mu\text{m}$ . Přesnost polohy tohoto otvoru na čele podléhá toleranci podle normy ISO 2768-mK. Model součásti je na obrázku 4.3.



Obrázek 4.3 Součást DP-161502-SČ-03.

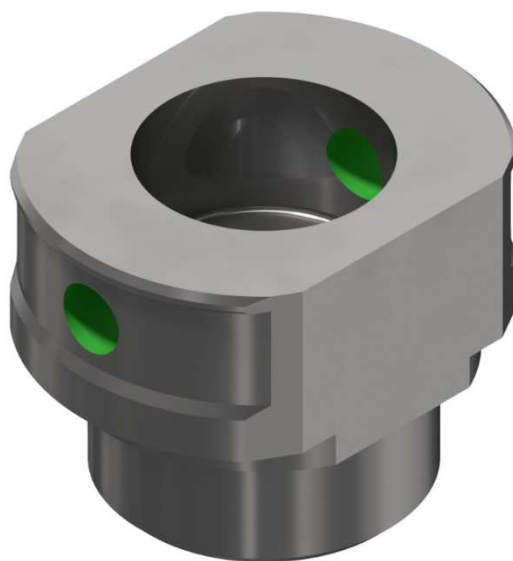
Součást č. DP-161502-SČ-04, technický výkres v příloze č. 4, je vyrobena z materiálu 19 312 (90MnCrV8) a je tepelně zpracována kalením na tvrdost 60 HRC. U součásti je dokončován otvor 3 mm s předepsanou tolerancí H7 a drsností povrchu  $R_a = 0,8 \mu\text{m}$ . Součást je zobrazena na obrázku 4.4.



Obrázek 4.4 Součást DP-161502-SČ-04.

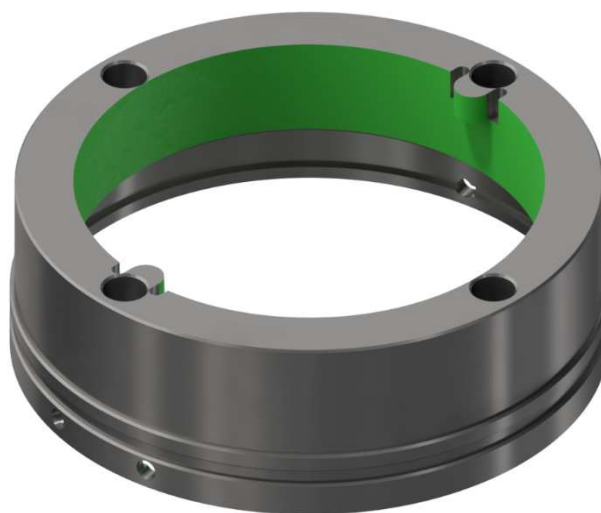
Součást č. DP-161502-SČ-05, technický výkres v příloze č. 5, je vyrobena z materiálu 19 487 (21MnCr5) a je tepelně zpracována kalením na tvrdost 60 HRC. U součásti je dokončován otvor 10 mm s předepsanou tolerancí H7 a drsností povrchu  $R_a = 0,4 \mu\text{m}$ . Přesnost polohy tohoto otvoru je s tolerancí  $\pm 0,05 \text{ mm}$  a podléhá také předepsaným geometrickým tolerancím kolmosti a rovinnosti o velikosti 0,01 mm. Součást je znázorněna na obrázku 4.5.





Obrázek 4.5 Součást DP-161502-SČ-05.

Součást č. DP-161502-SČ-06, technický výkres v příloze č. 6, je vyrobena z materiálu 15 142 (42CrMo4) a je tepelně zpracována zušlechtěním na pevnost 1200-1300 MPa. U součásti je dokončován otvor 96 mm s předepsanou tolerancí G7 a drsností povrchu  $R_a = 0,4 \mu\text{m}$ . Pro výčnělky v kruhu je také předepsaná geometrická tolerance polohy o velikosti 0,05 mm. Model součásti je na obrázku 4.6.



Obrázek 4.6 Součást DP-161502-SČ-06.

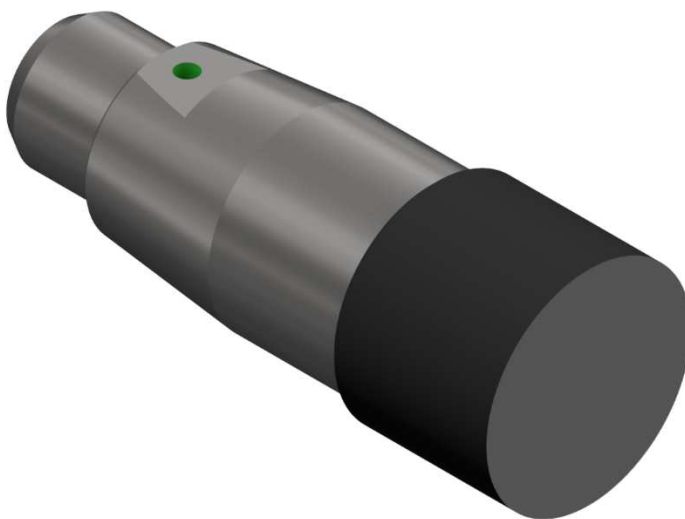
Součást č. DP-161502-SČ-07, technický výkres v příloze č. 7, je vyrobena z materiálu 14 220 (16MnCr5) a je tepelně zpracována kalením na tvrdost 60 HRC a cementována do hloubky 0,6 mm. U součásti je dokončován otvor na čele o velikosti 6 mm s předepsanou tolerancí  $^{+0,05}_{+0,0}$  mm a drsností povrchu  $R_a = 0,4 \mu\text{m}$ . Přesnost polohy tohoto otvoru je předepsána geometrickou tolerancí přesnosti polohy o velikosti 0,02 mm.

Dále jsou obráběny na součásti otvory 6 mm se zakončením do středu 3,2 mm. Tyto otvory jsou rozmístěny po obvodu součásti po 120° a mají předepsanou toleranci H7 pro otvor 6 mm a  $\begin{smallmatrix} +0,1 \\ +0,05 \end{smallmatrix}$  mm pro otvor 3,2 mm a drsnosti povrchů  $R_a = 0,4 \mu\text{m}$ . Dále jsou pro tyto otvory předepsány geometrické tolerance polohy o velikosti 0,05 mm a pro rozměr 6 mm je předepsána i geometrická tolerance kruhovitosti o velikost 0,01 mm. Součást je zobrazena na obrázku 4.7.



Obrázek 4.7 Součást DP-161502-SČ-07.

Součást č. DP-161502-SČ-08, technický výkres v příloze č. 8, je vyrobena z materiálu 19 312 (90MnCrV8) a je tepelně zpracována kalením na tvrdost 56 HRC. U součásti je dokončován otvor 4 mm s předepsanou tolerancí H7 a drsností povrchu  $R_a = 0,8 \mu\text{m}$ . Přesnost polohy tohoto otvoru je s tolerancí  $\pm 0,1 \text{ mm}$ . Součást je znázorněna na obrázku 4.8.



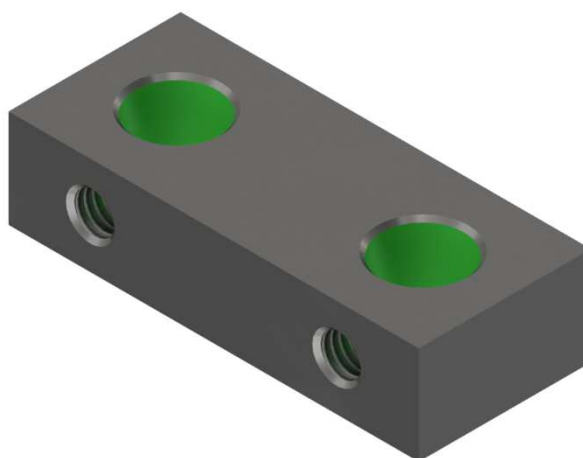
Obrázek 4.8 Součást DP-161502-SČ-08.

Součást č. DP-161502-SČ-09, technický výkres v příloze č. 9, je vyrobena z materiálu 17 024 (X39Cr13) a je tepelně zpracována kalením na tvrdost 54 HRC. U součásti jsou dokončovány otvory na čele, první otvor je o velikosti 6 mm s předepsanou tolerancí H7 a drsností povrchu  $R_a = 0,8 \mu\text{m}$  a druhý otvor má velikost 6 mm s předepsanou tolerancí H8 a drsností povrchu  $R_a = 0,4 \mu\text{m}$ . Pro rozměr 6 mm je předepsaná geometrická tolerance polohy o velikosti 0,02 mm a pro rozměr 28 mm je předepsána geometrická tolerance kruhovitosti o velikosti 0,02 mm. Model součásti je na obrázku 4.9.



Obrázek 4.9 Součást DP-161502-SČ-09.

Součást č. DP-161502-SČ-10, technický výkres v příloze č. 10, je vyrobena z materiálu 14 220 (16MnCr5) a je tepelně zpracována zušlechtěním na pevnost 1000-1200 MPa. U součásti jsou dokončovány otvory 10 mm s předepsanou tolerancí F8 a drsností povrchu  $R_a = 0,8 \mu\text{m}$ . Pro tyto otvory je předepsaná geometrická tolerance polohy o velikosti 0,05 mm. Součást je zobrazena na obrázku 4.10.



Obrázek 4.10 Součást DP-161502-SČ-10.

### 4.3 Výběr vhodné technologické metody obrábění otvorů

Z hlediska obrábění předepsaných otvorů součástí je při návrhu výrobní technologie kladen důraz na dodržení předepsané geometrie. Vybraná technologie pro výrobu součástí musí splňovat předepsané drsnosti povrchu a geometrické tolerance.

#### 4.3.1 Dokončení otvorů frézováním

Jedním ze způsobů obrábění předepsaných otvorů je využití frézování. Problémem při frézování je obrábění po tepelném zpracování. Aby bylo možno takto obrábět, je nutno využít břitů z kubického nitridu bóru, označovaného zkratkou KNB (někdy také CBN).

Při takovéto aplikaci frézování nastává problém s dosahováním předepsaných parametrů a to jmenovitě drsností povrchů. Tyto povrchy jsou obtížněji dosažitelné frézováním a je tedy vhodnější využít jiných dokončovacích operací.

Dosažitelné parametry přesností a drsností povrchů při obrábění frézováním jsou uvedeny v tabulce 4.1.

Tabulka 4.1 Tabulka dosažitelných přesností a drsností při frézování [19].

Způsob obrábění	Dosažitelná přesnost [mm]	Dosažitelná drsnost povrchu Ra [μm]
hrubování	IT 10 až 13	Ra > 12,5 R <sub>max</sub> ~ 100
obrábění na čisto	IT 7 až 13	Ra = 1,6 až 6,3
jemné obrábění	IT 7 až 8	Ra = 0,8 až 1,6

Další nevýhodou při frézování je malá přesnost najíždění do pozice otvorů. A také obrábění menších otvorů, které se u součástí vyskytují docela běžně, by vyžadovalo speciální nástroje.

Frézování není vhodnou volbou typu obrábění pro dané součásti.

#### 4.3.2 Broušení na planetové brusce Hauser H45-400

Dalším způsobem obrábění součástí je využití aplikace broušení. Broušení a aplikace broušení jsou popsány v kapitolách 1 a 2. Jednalo by o obrábění na stroji Hauser H45-400, který je rozveden v kapitole 3.

Z tabulky č. 1.2 v 1. kapitole je patrné, že vnitřním broušením na čisto je dosahováno předepsaných rozměrů, geometrických tolerancí a kvalitativních parametrů součástí.

Broušení je vhodnou volbou typu obrábění pro dané součásti.

### 4.3.3 Obrábění elektroerozivním obráběním

Dále je uvažováno o aplikaci nekonvenční metody obrábění pomocí elektroeroze. Jmenovitě využití aplikace hloubení, EDM, pro neprůchozí otvory, a aplikace drátového řezání, EDWC, pro otvory průchozí.

Elektroerozivní obrábění obvykle dosahuje drsností povrchů od  $R_a = 50 \mu\text{m}$  po  $R_a = 0,2 \mu\text{m}$ . Tato drsnost je odvislá od mnoha faktorů, především od přídavku na obrobení a času obrábění. [20]

Dosažitelné parametry přesností a drsností povrchů při obrábění elektroerozí jsou uvedeny v tabulce 4.2.

Tabulka 4.2 Tabulka dosažitelných přesností a drsností při EDM [20].

Způsob obrábění	Dosažitelná přesnost [mm]	Dosažitelná drsnost povrchu $R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]
opracování na hrubo impulsní zdroje velká energie výboje (hloubení)	$\pm 0,02$ až $\pm 0,5$	$R_a > 6,3$ $R_{\text{max}} \sim 25$
normální opracování impulsní zdroje	$\pm 0,01$ až $\pm 0,02$	$R_a = 1,6$ až $6,3$ $R_{\text{max}} = 8$ až $25$
jemné a velmi přesné obrábění vysokofrekvenční zdroje řezání drátovou elektrodou	$\pm 0,005$ až $\pm 0,01$	$R_a = 0,8$ až $1,6$ $R_{\text{max}} < 6$
elektroerozivní leštění (přesné řezání drátovou elektrodou)	až $\pm 0,002$	$R_a = 0,2$ až $0,8$ $R_{\text{max}} < 2,5$ až $4$

Z této tabulky vyplývá, že při elektroerozivní leštění a přesným řezáním drátovou elektrodou je možno splnit předepsané kvalitativní parametry součástí.

Elektroerozivní obrábění je vhodnou volbou pro typy obrábění pro dané součásti.

### 4.4 Výběr nejvhodnější výrobních metod

Pro výrobu daných součástí je zvolena konveční metoda obrábění planetovým broušením a nekonveční metoda elektroerozivního obrábění. Tyto dvě výrobní metody budou vůči sobě v následující kapitole porovnávány.

## 5 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

V předchozí kapitole byly vybrány nejvhodnější typy obrábění otvorů vybraných součástí a to broušení a elektroeroze. Tyto způsoby obrábění porovnáme z hlediska výrobních časů. Strojní časy bývají předepisovány z podnikových normativů nástrojárny dle rozměrů součástí, kde výroba součástí probíhá, ovšem v tomto případě budeme porovnávat strojní časy skutečné, měřené u stroje. Dále jsou porovnávány výroby i z hlediska obvykle dosahovaných parametrů drsnosti povrchu po obrábění a nákladů na výrobu otvorů.

### 5.1 Porovnání výroby z hlediska strojních časů

Měření strojního času operace probíhalo přímo u strojů. Takto naměřené časy jsou uvedeny v tabulce 5.1. Dále tabulka společně se strojními časy uvádí i časy přípravy pro jednotlivé součásti.

Tabulka 5.1 Strojní časy broušení a elektroerozivního obrábění u součástí.

Číslo součásti	Strojní čas operace $t_A$ [min]		Čas přípravy $t_B$ [min]
	Broušení	EO	
DP-161502-SČ-01	11,65	28,37	20
	11,39	27,92	
DP-161502-SČ-02	19,74	37,21	30
	19,55	37,03	
DP-161502-SČ-03	36,83	141,36	45
	36,41	139,95	
DP-161502-SČ-04	11,21	13,14	20
	11,09	12,96	
	11,14	13,09	
	10,99	13,04	
	11,18	12,99	
DP-161502-SČ-05	22,69	28,92	20
	22,22	29,03	
	22,53	28,82	
	22,43	29,12	
	22,64	28,98	
DP-161502-SČ-06	117,83	175,56	30
	114,58	178,23	
DP-161502-SČ-07	54,21	239,41	30
	53,62	238,79	

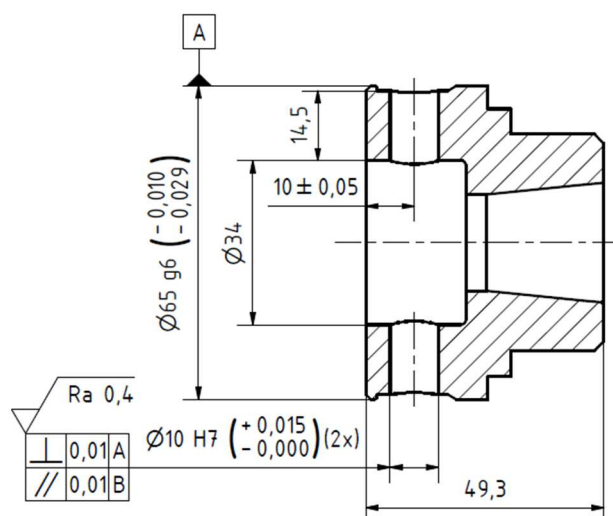
Číslo součásti	Strojní čas operace $t_A$ [min]		Čas přípravy $t_B$ [min]
	Broušení	EO	
DP-161502-SČ-08	10,29	14,82	20
	9,98	14,59	
	10,22	14,70	
	10,08	14,48	
DP-161502-SČ-09	27,41	114,79	20
DP-161502-SČ-10	22,26	29,86	15
	21,95	29,62	
	22,14	29,75	
	22,19	30,08	
	22,04	29,95	

Z naměřených časů vyplývá, že výroba součástí pomocí broušení dosahuje zhruba dvojnásobně rychlejších strojních časů a je tedy výhodnější vzhledem k elektroerozivnímu obrábění.

## 5.2 Obvykle dosahované parametry drsnosti po obrábění obou metod

Z technologického hlediska porovnání těchto dvou alternativních metod obrábění daných součástí, lze porovnat výsledky kvality povrchu součástí po obrobení. Bylo provedeno měření na několika součástech jak po elektroerozivním obrábění, tak po broušení, pro ověření obvykle dosahovaných parametrů drsnosti. Kvalita povrchu byla posuzována pomocí střední aritmetické úchyly profilu  $R_a$  a největší výšky profilu drsnosti  $R_z$ .

První měření bylo provedeno na součásti číslo DP-161502-SČ-05, kde výkresovou dokumentací předepsaná drsnost povrchu je  $R_a = 0,4 \mu\text{m}$ . Obráběný otvor na součásti je znázorněn na obrázku č. 5.1.

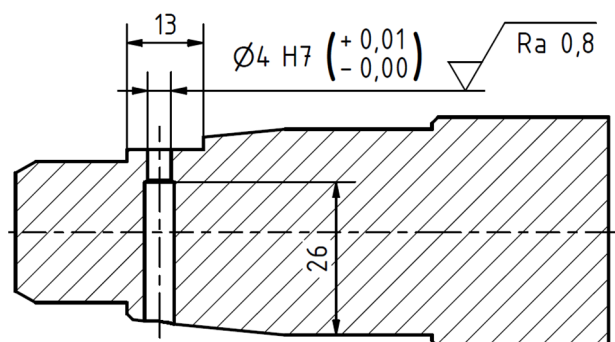


Obrázek 5.1 Obráběný otvor součásti DP-161502-SČ-05.



Na povrchu otvoru byla naměřena po broušení střední aritmetická úchylky profilu o velikosti  $R_a = 0,3357 \mu\text{m}$  a největší výška profilu drsnosti  $R_z = 1,9797 \mu\text{m}$ . Po elektroerozivním obrábění tyto parametry dosahovaly následujících hodnot a to  $R_a = 0,3153 \mu\text{m}$  a  $R_z = 2,5845 \mu\text{m}$ . Protokoly z měření povrchu jsou uvedeny v přílohách č. 11 a 12.

Druhé měření bylo provedeno na součásti číslo DP-161502-SČ-08, kde výkresovou dokumentací předepsaná drsnost povrchu je  $R_a = 0,8 \mu\text{m}$ . Obráběný otvor na součásti je znázorněn na obrázku č. 5.2.



Obrázek 5.2 Obráběný otvor součásti DP-161502-SČ-08.

Na povrchu otvoru byla naměřena po broušení střední aritmetická úchylky profilu o velikosti  $R_a = 0,4608 \mu\text{m}$  a největší výška profilu drsnosti  $R_z = 3,0270 \mu\text{m}$ . Po elektroerozivním obrábění tyto parametry dosahovaly následujících hodnot a to  $R_a = 0,4449 \mu\text{m}$  a  $R_z = 2,8281 \mu\text{m}$ . Protokoly z měření povrchu jsou uvedeny v přílohách č. 13 a 14.

Měření dokazuje, že obě metody jsou schopny dosahovat výkresem předepsaných parametrů drsnosti povrchu obrobených otvorů součástí. Z tohoto hlediska jsou tedy obě výrobní metody vyhovující. U elektroerozivního obrábění musíme vynaložit větší jednotkový strojní čas výroby pro dosažení požadovaných parametrů.

### 5.3 Porovnání výroby z hlediska nákladů

Náklady na výrobu otvorů se odvíjí od délky strojního času operace a času přípravy dávky na zadanou operaci výroby. Součásti jsou obráběny na nástrojárně, kde je prováděna kusová výroba, a pro všechny strojní operace je vedena jednotná tarifní cena a to 18 Kč/minuta.

Stanovení nákladů tedy spočívá ve vyjádření doby obrábění při operaci pomocí strojního času operace, času přípravy poděleného počtem kusů ve výrobní dávce, protože dávkový čas je počítán pro přípravu celé výrobní dávky.

$$T = t_A + \frac{t_B}{n} \quad (5.1)$$

kde:  $T$  [min] ..... čas výrobní dávky,  
 $t_A$  [min] ..... strojní čas broušení/elektroerozivního obrábění,  
 $t_B$  [min] ..... čas přípravy na výrobní dávku,  
 $n$  [ks] ..... počet součástí v dávce.

Po dosazení jednotlivých hodnot z tabulky č. 5.1 do vzorce 5.1 je vypočtena doba výroby otvoru u jednotlivých součástí u obou metod. Po přenásobení těchto hodnot tarifní cenou nástrojární dostáváme cenu operace. Tyto výpočty jsou uvedeny v tabulce č. 5.2.

Tabulka 5.2 Čas výroby a náklady broušení a elektroerozivního obrábění u součástí.

Číslo součásti	Dávkový čas operace [min]		Náklady operace [Kč]		Porovnání času operací Broušení/EO [%]
	Broušení	EO	Broušení	EO	
DP-161502-SČ-01	21,52	38,15	387	687	56,41
DP-161502-SČ-02	34,65	52,12	624	938	66,48
DP-161502-SČ-03	59,12	163,16	1064	2937	36,23
DP-161502-SČ-04	15,12	17,04	272	307	88,73
DP-161502-SČ-05	26,50	32,97	477	593	80,37
DP-161502-SČ-06	131,21	191,90	2362	3454	68,37
DP-161502-SČ-07	68,92	254,10	1241	4574	27,12
DP-161502-SČ-08	15,14	19,65	273	354	77,05
DP-161502-SČ-09	47,41	134,79	853	2426	35,17
DP-161502-SČ-10	25,12	32,85	452	591	76,47

Z uvedených podkladů vyplývá, že aplikace broušení je vhodnější, než-li aplikace elektroerozivního obrábění.

## ZÁVĚR

Diplomová práce shrnuje problematiku třískového obrábění – broušení. Elaboruje její princip a využití, používané nástroje a dosahované parametry, kinematiku procesu. Práce dále rozebírá brusné centrum Hauser H45-400, na kterém probíhá planetové broušení otvorů součástí na nástrojárně. Rozbor stroje Hauser H45-400 obsahuje kinematiku stroje, parametry stroje a příslušenství ke stroji.

V práci byla vyhodnocena aplikace broušení na tomto stroji na vybraných 10 součástech z hlediska přesnosti výroby, dosahovaných kvalitativních parametrů a doby výroby. Jedná se o součásti ocelové – jak konstrukční, tak nástrojové, u kterých je ve výrobní dokumentaci předepisována vysoká přesnost a kvalitní povrch otvorů. Tyto součásti jsou tepelně zpracované – kalené, cementované i zušlechťované. Výroba byla porovnána s výrobami alternativními, kde byla navržena aplikace frézování a elektroerozivního obrábění, jmenovitě elektroerozivního hloubení a elektroerozivního řezání drátem. Z metod pro výrobu byla vyřazena metoda frézování jako nevhodná, vzhledem k negativům vyvstávajícím s obráběním součástí. Součásti jsou tepelně zpracované, a tudíž je nutné obrábět s břity z KNB (CBN), což je z hlediska výroby malých otvorů náročné. Při takovéto aplikaci frézování není dosahováno předepsaných kvalitativních parametrů, což je nevyhovující. Další nevýhodou u frézování je malá přesnost při najíždění do pozice otvorů. Metoda elektroerozivního obrábění z hlediska předepsaných parametrů přesnosti a kvality vyhovuje, tudíž byla vybrána jako metoda alternativní vůči broušení.

Porovnání parametrů (strojní časy v minutách a náklady na operaci v korunách) uvažovaných dvou metod (broušení – elektroerozivní obrábění) u jednotlivých součástí je následující:

	čas broušení [min]	náklady broušení [Kč]	čas EO [min]	náklady EO [Kč]	čas B/EO [%]
<b>DP-161502-SČ-01:</b>	21,52	387	38,15	687	56,41
<b>DP-161502-SČ-02:</b>	34,65	624	52,12	938	66,48
<b>DP-161502-SČ-03:</b>	59,12	1 064	163,16	2 937	36,23
<b>DP-161502-SČ-04:</b>	15,12	272	17,04	307	88,73
<b>DP-161502-SČ-05:</b>	26,50	477	32,97	593	80,37
<b>DP-161502-SČ-06:</b>	131,21	2 362	191,90	3 454	68,37
<b>DP-161502-SČ-07:</b>	68,92	1 241	254,10	4 574	27,12
<b>DP-161502-SČ-08:</b>	15,14	273	19,65	354	77,05
<b>DP-161502-SČ-09:</b>	47,41	853	134,79	2 426	35,17
<b>DP-161502-SČ-10:</b>	25,12	452	32,85	591	76,47

Z technicko-ekonomického zhodnocení vyplývá, že výroba otvorů pomocí broušení dosahuje zhruba polovičních strojních časů. Pro kusovou výrobu na nástrojárně je veden jednotný cenový tarif 18 Kč/minuta pro všechny strojní operace, tudíž broušení vychází lépe i z ekonomického hlediska.

**SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ**

1. MASLOV, Je. N. *Teorie broušení kovů*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1979.
2. HUMÁR, A. *Technologie 1: Technologie obrábění – 3. část* [online]. VUT-FSI v Brně, 2005 [cit. 2016-03-14]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/Dokoncovaci\\_a\\_nekonvencni\\_metody\\_obrabeni/TI\\_TO-3.cast.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/Dokoncovaci_a_nekonvencni_metody_obrabeni/TI_TO-3.cast.pdf)
3. ŘASA, Jaroslav a Vladimír GABRIEL. *Strojírenská technologie 3*. 2. vyd. Praha: Scientia, 2005. ISBN 80-718-3337-1.
4. KOČMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. *Technologie obrábění*. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005, s. 143-159. ISBN 80-214-3068-0.
5. ROWE, W. B. *Principles of modern grinding technology*. Norwich, NY: William Andrew, c2009. ISBN 978-081-5520-184.
6. DOBROVOLNÝ, Bohumil. *Broušení kovů: teoretické i praktické základy brusičské praxe a příklady nové techniky broušení*. Praha: SNTL, 1959. Knižnice strojírenské výroby.
7. MARINESCU, Ioan D., H. K. TÖNSHOFF a Ichiro. INASAKI. *Handbook of ceramics grinding and polishing: properties, processes, technology, tools and typology*. Norwich, N.Y.: William Andrew Pub. ISBN 08-155-1424-7.
8. HEJL, Miroslav a Petr JALŮVKA. *Obrábění a zpracování kovů: Broušení. Elektronická učebnice* [online]. 2015, 2015 [cit. 2018-04-14]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1240>
9. *Kellenberger: Jig-grinders* [online]. 2009 [cit. 2018-04-14]. Dostupné z: <https://www.kellenberger.com/english/jig-grinders/default.html>
10. JACKSON, Mark J. *Modern machining technology: a practical guide*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2011, s. 305-333. Woodhead Publishing in mechanical engineering. ISBN 978-0-85709-099-7.
11. *Smithsonian National Museum of Natural History: Early Stone Age Tools* [online]. 2018 [cit. 2018-04-18]. Dostupné z: <http://humanorigins.si.edu/evidence/behavior/stone-tools/early-stone-age-tools>
12. *History of Ancient Egypt: Ancient Egyptian Tools* [online]. 2018 [cit. 2018-04-14]. Dostupné z: <http://www.ancientegyptianfacts.com/ancient-egyptian-tools.html>
13. Grindstone: Finch Foundry - grindstone. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-04-14]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Grindstone#/media/File:Finch\\_Foundry,\\_grindstone.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Grindstone#/media/File:Finch_Foundry,_grindstone.jpg)
14. MALKIN, Stephen a Changsheng GUO. *Grinding technology: theory and application of machining with abrasives*. 2nd ed. New York: Industrial Press, 2008. ISBN 978-0-8311-3247-7.
15. *TumliKOVO: Metal Cutting Technologies* [online]. 2010 [cit. 2018-04-14]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/zakladni-rozdeleni-brusnych-kotoucu-k-ostreni-nastroju/>

16. *Taima* [online]. 2014 [cit. 2018-04-14]. Dostupné z: <http://www.taima.cz/hrotove-brusky/cnc-brusky/>
17. *Procházka - Moravec: prodej a opravy brousících strojů* [online]. 2009 [cit. 2018-04-14]. Dostupné z: <http://www.opravybrusek.cz/stroje/BB6/>
18. *Stroje Svoboda* [online]. [cit. 2018-04-14]. Dostupné z: <https://strojesvoboda.cz/12812>
19. VIGNER, Miloslav a Zdeněk PŘIKRYL. *Obrábění*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1984, 808 s.
20. ŠEDO, V. *Výroba pertlovací matice s pomocí elektroerozivního obrábění*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 44 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Ladislav Kolář.

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

<b>Zkratka</b>	<b>Popis</b>
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Oxid hlinitý
CNC	Computer numeric control
EDM	Electrical discharge machining
EDWC	Electrical discharge wire cutting
EO	Elektroerozivní obrábění
KNB (CBN)	Polykrystalický kubický nitrid boru
NC	Numeric control
SiC	Karbid křemíku

<b>Symbol</b>	<b>Jednotka</b>	<b>Popis</b>
IT	[-]	stupeň přesnosti
R <sub>a</sub>	[μm]	střední aritmetická úchylka profilu drsnosti
R <sub>z</sub>	[μm]	největší výška profilu drsnosti
a <sub>e</sub>	[mm]	radiální záběr
t <sub>A</sub>	[min]	strojní čas operace
t <sub>B</sub>	[min]	čas přípravy na výrobní dávku
v <sub>c</sub>	[m·min <sup>-1</sup> ]	řezná rychlost
v <sub>w</sub>	[m·min <sup>-1</sup> ]	obvodová rychlost obrobku

**SEZNAM PŘÍLOH**

Příloha 1: Technický výkres 1. součásti (DP-161502-SČ-01)

Příloha 2: Technický výkres 2. součásti (DP-161502-SČ-02)

Příloha 3: Technický výkres 3. součásti (DP-161502-SČ-03)

Příloha 4: Technický výkres 4. součásti (DP-161502-SČ-04)

Příloha 5: Technický výkres 5. součásti (DP-161502-SČ-05)

Příloha 6: Technický výkres 6. součásti (DP-161502-SČ-06)

Příloha 7: Technický výkres 7. součásti (DP-161502-SČ-07)

Příloha 8: Technický výkres 8. součásti (DP-161502-SČ-08)

Příloha 9: Technický výkres 9. součásti (DP-161502-SČ-09)

Příloha 10: Technický výkres 10. součásti (DP-161502-SČ-10)

Příloha 11: Protokol naměřené drsnosti po elektroerozivním obrábění  
u součásti DP-161502-SČ-05

Příloha 12: Protokol drsnosti povrchu po broušení u součásti DP-161502-SČ-05

Příloha 13: Protokol naměřené drsnosti po elektroerozivním obrábění  
u součásti DP-161502-SČ-08

Příloha 14: Protokol drsnosti povrchu po broušení u součásti DP-161502-SČ-08